



DANILO DOS SANTOS SANTANA
IANDRO NICORY DE BRITO FERNANDES
JULIA DE FREITAS MARTINS
LEONARDO POMPEU MOTA
MATHEUS SOUZA BEZERRA

TÚNEL DE VENTO

SALVADOR

2024

DANILO DOS SANTOS SANTANA
IANDRO NICORY DE BRITO FERNANDES
JULIA DE FREITAS MARTINS
LEONARDO POMPEU MOTA
MATHEUS SOUZA BEZERRA

TÚNEL DE VENTO

Trabalho apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Católica do Salvador, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Me. Helmut Piper

SALVADOR

2024

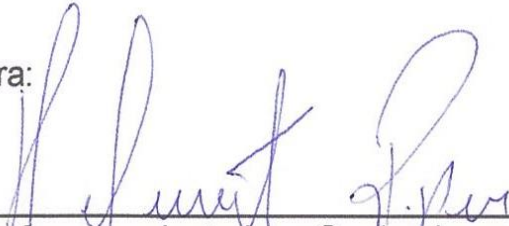
DANILO DOS SANTOS SANTANA
IANDRO NICORY DE BRITO FERNANDES
JULIA DE FREITAS MARTINS
LEONARDO POMPEU MOTA
MATHEUS SOUZA BEZERRA

TÚNEL DE VENTO

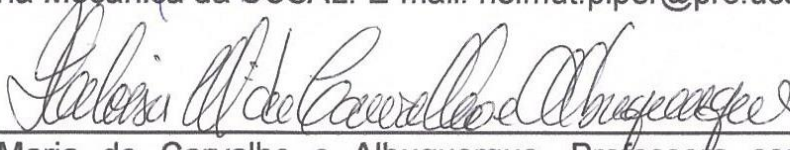
Monografia aprovada como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Católica do Salvador.

Salvador, 15 de junho de 2024

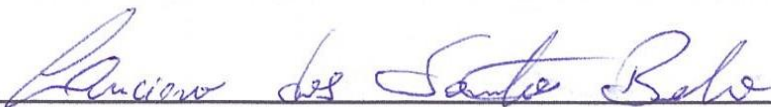
Banca Examinadora:



Helmut Piper, Professor orientador. Graduado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Paraná (UFPR); Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial pela Faculdade Tecnológica Senai Cimatec; Docente do curso superior de Engenharia Mecânica da UCSAL. E-mail: helmut.piper@pro.ucsal.br.



Heloisa Maria de Carvalho e Albuquerque, Professora componente da banca. Graduada em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal da Bahia (UFBA); Mestre em Regulação da Indústria de Energia pela Unifacs; Docente do curso superior de Engenharia Mecânica da UCSAL. E-mail: heloisa.albuquerque@pro.ucsal.br.



Luciano dos Santos Belo, Componente da banca atualmente trabalhando na Companhia de Gás da Bahia (BahiaGás), Graduado em Engenharia Mecânica pela Universidade Estácio, Mestrando em Engenharia de Materiais pelo Instituto Federal da Bahia (IFBa). E-mail: drbelo@hotmail.com.

RESUMO

Para fins acadêmicos a utilização de protótipos de máquinas e equipamentos são cada vez mais utilizados, possibilitando a ampliação do conhecimento teórico e a sua comparação com métodos práticos. Este trabalho visa a construção de um túnel de vento, aberto, subsônico e em escala reduzida, além de representar a possibilidade da ampliação dos estudos que envolvem a mecânica dos fluidos e suas interações sobre os objetos sólidos. A utilização desses equipamentos contribui para o desenvolvimento de soluções para problemas em condições reais da atualidade. Conhecimentos diversos, obtidos na literatura possibilitam, projetar e construir o protótipo do túnel de vento e auxiliam o entendimento dos aspectos internos envolvidos nesse tipo de equipamento, tais como perda de carga, dimensionamento dos componentes, fluxo de ar e tipo de escoamento. Permitem ainda o teste de outros protótipos associados aos segmentos de geração de energia eólica, estudo da eficiência das pás de ventiladores, geradores e na eficiência do desempenho dos motores elétricos, bem como aplicações na engenharia civil e na arquitetura.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Túnel de vento do Instituto de Aeronáutica e Espaço	12
Figura 2	Etapas da <i>Design Science Research</i>	15
Figura 3	Vista isométrica túnel de vento circuito aberto	20
Figura 4	Vista isométrica túnel de vento circuito fechado	21
Figura 5	Seções típicas de um túnel de vento	22
Figura 6	Estrutura bocal convergente	28
Figura 7	Colmeia	30
Figura 8	Tela	33
Figura 9	Exemplo de seção de Testes	37
Figura 10	Representação do difusor	39
Figura 11	Máquina de fumaça	44
Figura 12	Anemômetro tipo hélice	44
Figura 13	Sensor de vibração	45
Figura 14	Seção de testes	48
Figura 15	Bocal convergente	49
Figura 16	Bocal divergente	50
Figura 17	Colmeia	50
Figura 18	Vistas isométricas projeto túnel de vento	52
Figura 19	Registro da velocidade do ar com anemômetro digital	55
Figura 20	Teste da visualização do fluxo de ar	56
Figura 21	Teste de hermeticidade	57
Figura 22	Teste de nível de ruído	57
Figura 23	Teste do deslocamento do fluxo de ar	58

Figura 24	Tela de fios de nylon	59
Figura 25	Seção de testes	59
Figura 26	Exaustor axial industrial 1 Hp de potência	60
Figura 27	Perspectiva isométrica do túnel	60
Figura 28	Primerio túnel de vento brasileiro	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Cronograma dos meses de agosto a outubro de 2023	17
Tabela 2	Cronograma do mês de outubro de 2023 ao mês de março de 2024	17
Tabela 3	Cronograma dos meses de abril a maio de 2024	18

LISTA DE QUADRO

Quadro 1	Relação das peças	16
----------	-------------------	----

LISTA DE SÍMBOLOS

Ma	Número de Mach
c	Velocidade do som no fluido
ΔP_i	Perda de pressão
ΔP	Perda de pressão total
Σ	Somatório
k	Coeficiente de perda
$\rho V_i^2/2$	Pressão dinâmica
R_{ent}	Raio hidráulico de entrada
R_{sai}	Raio hidráulico de saída
V_{ent}	Velocidade de entrada
V_{sai}	Velocidade de saída
L	Comprimento
θ_e	Ângulo cônico
A	Área
A_r	Razão entre as áreas
f	Fator de atrito médio
Re_w	Número de Reynolds do arame
β	Porosidade
D	Diâmetro hidráulico
d_t	Diâmetro do fio
q	Pressão dinâmica
σ_s	Solidez
Q	Vazão
V	Velocidade
U	Fator de redução de turbulência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	PROBLEMA	13
1.2	OBJETIVO	13
1.2.1	Objetivo geral	14
1.2.2	Objetivos específicos	14
1.3	JUSTIFICATIVA	14
1.4	METODOLOGIA	15
1.5	ORÇAMENTO	16
1.6	CRONOGRAMA	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	CONCEITO DE TÚNEL DE VENTO	19
2.2	MECÂNICA DOS FLUIDOS	23
2.2.1	Arrasto e sustentação	24
2.2.2	Camada limite	24
2.2.3	Tipos de escoamento	25
2.2.4	Número de Reynolds	25
2.2.5	Número Mach	26
2.2.6	Perda de carga	26
2.3	ESPECIFICAÇÕES	27
2.3.1	Bocal de contração	27
2.3.2	Seção de estabilização	29
2.3.3	Seção de testes	36
2.3.4	Bocal difusor	38

2.3.5	Hélice	42
2.3.5.1	Partes que compõem as hélices	42
2.4	INSTRUMENTAÇÃO	43
2.4.1	Máquina de fumaça	43
2.4.2	Anemômetro	44
2.4.3	Sensor de vibração	45
2.4.4	Sensor de ruídos	45
2.4.5	Balança	45
2.4.6	Asa mecânica	46
3	DESENVOLVIMENTO	47
3.1	SEÇÃO DE TESTES	47
3.2	BOCAL CONVERGENTE	48
3.3	BOCAL DIVERGENTE	49
3.4	COLMEIA	50
3.5	PROJETO DO TÚNEL DE VENTO	51
3.6	TESTES DE DESEMPENHO	52
3.6.1	Teste de velocidade do ar	53
3.6.2	Teste de visualização do fluxo de ar	53
3.6.3	Teste de hermeticidade	53
3.6.4	Teste do nível de ruído	53
3.6.5	Teste do deslocamento do fluxo de ar	54
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO	55
4.1	VELOCIDADE DO AR	55
4.2	ESCOAMENTO	56

4.3	HERMETICIDADE	56
4.4	NÍVEL DE RUÍDO	57
4.5	INTERAÇÃO DO FLUXO DE AR COM SÓLIDOS	58
4.6	SUGESTÃO DE MELHORIA	58
5	CONCLUSÃO	62
	REFERÊNCIAS	

1 INTRODUÇÃO

Uma das formas de obter o conhecimento sobre os fenômenos que envolvem o comportamento, a interação do ar e o seu deslocamento com os diversos equipamentos construídos pelo homem moderno é através da utilização de modelos e protótipos de túneis de vento. O estudo das suas interações possibilita a obtenção de respostas para a solução de problemas em diversas áreas de estudo, como por exemplo, a aeronáutica, construção civil e a engenharia mecânica. Tais estudos devem ser capazes de simular o comportamento do ar, fluido no estado gasoso, fornecendo as respostas necessárias para o avanço no desenvolvimento de soluções ligadas à segurança e eficiência energética.

Neste tipo de equipamento, é possível a realização de simulações em ambiente controlado, do funcionamento de vários utensílios mecânicos que podem utilizar o ar como fonte de geração de movimento, sendo capazes de fornecerem dados para o desenvolvimento de soluções para problemas de eficiência e rendimento de motores, características do funcionamento das peças e componentes diversos, além do desenvolvimento das técnicas e metodologias para a simulação de testes de tais equipamentos.

Com o túnel do vento, protótipos em escala reduzida como aerogeradores, moinhos, ventiladores, entre outros, podem ser testados verificando quais as condições adequadas de vento, assim como as características das estruturas das pás ou hélices, que fazem parte de alguns protótipos. Considerando, que a partir desses estudos, testes e simulações podem trazer os melhores resultados em relação a problemas de eficiência e que direcionam tais estudos para a correção ou implementação dos seus componentes.

Conforme Oliveira (2014), existem túneis em dimensões que são capazes de testar objetos em tamanho real, sendo capazes de testar carros e aeronaves. Ainda conforme Oliveira (2014), o objeto de estudo de túneis de vento com tais dimensões é a aerodinâmica, onde os resultados obtidos favorecem a fabricação de produtos com melhores perfis geométricos. Para Queiroga e Viana (2021), “o estudo da aerodinâmica foi impulsionado pela necessidade de melhorar o desempenho e o consumo de combustíveis de carros e aviões”. Queiroga e Viana (2021) continuam informando que os túneis de vento podem ser construídos em diversas formas e tamanhos, e que também apresentam variação de velocidade em seu interior.

De acordo com Oliveira (2014), aqueles capazes de testar objetos em tamanho real são túneis muito caros devido às dimensões, como, por exemplo, o túnel existente no centro de pesquisa da *NASA*, o centro *Langley*, na cidade de *Hamptom* no estado da *Virgínia*, nos Estados Unidos da América. O túnel tem dimensões suficientes para ensaios de aeronaves. Para estudos de laboratório, a maioria usa modelos em escalas reduzidas e conseqüentemente, de menor investimento. Sobre a utilização dos túneis de vento, ressaltam Carminatti e Konrath (2019) que, “o emprego de túneis de vento para analisar os fenômenos aerodinâmicos ocorre a fim de obter segurança, confiabilidade, eficiência e a redução de custos de projetos”.

Na América Latina, o maior túnel de vento fica no Instituto de Aeronáutica e Espaço em São José dos Campos no estado de São Paulo, no Brasil. O instituto faz parte da Base da Força Aérea Brasileira. O equipamento tem dimensões suficientes para os testes com equipamentos em suas estruturas originais, como carros e aeronaves. Os pesquisadores utilizam o equipamento para a simulação do deslocamento do ar, também denominado de escoamento, e suas interações com as diversas estruturas sólidas, conforme Figura 1.

Figura 1 - Túnel de vento do Instituto de Aeronáutica e Espaço.



Fonte: Jornal da USP, 2016

De acordo com Brasiliano (2022) “os túneis de vento foram desenvolvidos em razão da necessidade de se estudar o comportamento aerodinâmico dos objetos em um determinado escoamento”. Ainda de acordo com o autor, considerando o

desenvolvimento da dinâmica dos fluidos computacional ou *Computational fluid dynamics* (CFD) em meados dos anos 70 e 80, acreditava-se que os protótipos de túnel de vento seriam rapidamente substituídos, porém o fato não ocorreu. Os protótipos com baixo custo apresentaram-se como alternativas atrativas para simulações e aplicações reais, além de representarem uma alternativa de comparação dos dados teóricos, obtidos pelas ferramentas da computação, com os dados obtidos nos testes e simulações.

Outro equipamento de grandes dimensões foi construído com o patrocínio de empresas estatais no território brasileiro como, por exemplo, o túnel de vento da empresa Furnas, do governo federal, que desempenha atividades na área de geração de energia elétrica. A inauguração ocorreu em dezembro do ano de 2018, colocando à disposição dos pesquisadores um túnel de vento para a simulação da ação do vento nas estruturas utilizadas na geração de energia eólica no país, como as torres e as hélices dos aerogeradores.

1.1 PROBLEMA

Para melhor entender o comportamento do fluxo do ar, arrasto, sustentação e camada limite, é necessário construir equipamentos que possam simular esses fenômenos em ambientes controlados e de uma maneira que possam ser testados. A busca por eficiência, melhoria de processos e equipamentos têm sido cada vez mais requeridas pelas empresas, sejam elas do segmento industrial, automotivo ou de geração de energia. Atualmente simulações e testes aerodinâmicos têm sido fundamentais para melhorias em estruturas no ramo de construção civil, produção de veículos automotores, aeronaves, bem como o rendimento a longo prazo, solucionando problemas de durabilidade em ambientes extremos.

Levando em consideração essas simulações e testes, é possível construir um protótipo de túnel de vento aberto, subsônico, que produza correntes de ar superiores a uma velocidade média dos ventos de 13 m/s?

1.2 OBJETIVO

A construção de um protótipo de túnel de vento obedecendo a critérios técnicos de dimensionamento, simulação em 3D e realização de cálculos matemáticos, para

orientar nos critérios de dimensões, escolha dos materiais, orçamento e compra dos dispositivos. O protótipo deve proporcionar um ambiente controlado no qual teremos a conversão do ar turbulento vindo do ambiente, para o ar laminar, se comportando de modo homogêneo.

1.2.1 Objetivo geral

Esse trabalho tem o objetivo de projetar e construir um protótipo de túnel de vento aberto subsônico.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) projetar o túnel do vento no *software* de desenho;
- b) construir o protótipo;
- c) testar o protótipo.

1.3 JUSTIFICATIVA

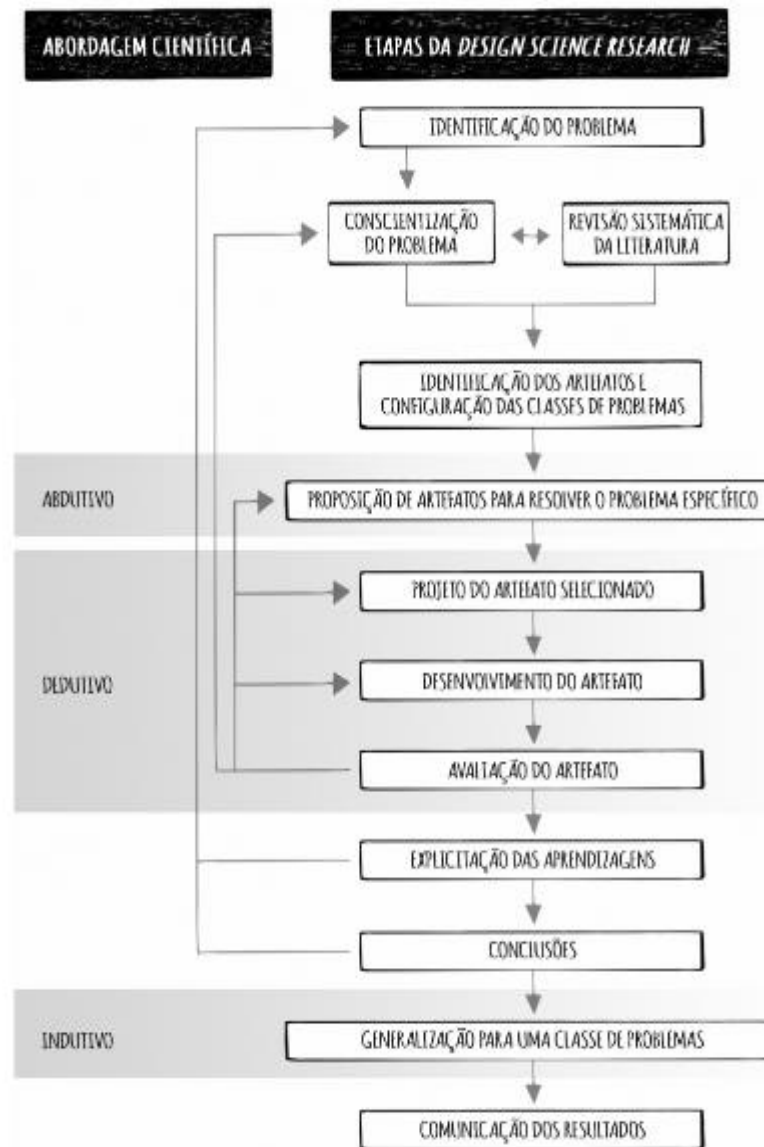
O projeto de construção de um túnel de vento possui muitas aplicações reais. No segmento automobilístico, testes para avaliar o comportamento do veículo quando submetido ao meio fluído, assim, pode-se obter dados matemáticos sobre desempenho do automóvel, deformações que podem ocorrer por um período naquelas condições de ventania.

Estudos sobre a construção de estruturas de engenharia civil, sendo esse um segmento que, em específico, demanda muitas análises sobre os esforços sofridos pela estrutura sob condições adversas, como furacões e chuvas com ventos fortes. Temos a geração de energia eólica, que tem como base o estudo do comportamento dos ventos, em determinadas regiões para mapear as melhores regiões de instalação das torres. Por fim, realizar o estudo da construção do túnel de vento e simular condições controladas de vento superiores a 13 m/s e aplicar testes com equipamentos complementando ainda mais as pesquisas sobre eficiência energética e melhoria de processos.

1.4 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento desse projeto a metodologia escolhida foi a *Design Science Research* (DSR), que utiliza os conceitos de desenhar e projetar a favor de se obter conhecimento. Conforme Figura 2, segue ilustração do processo da DSR.

Figura 2 - Etapas da *Design Science Research*.



Fonte: Dresch, 2015

O primeiro passo é identificar e conceituar o problema, definindo a maneira como o protótipo poderá contribuir para a solução deste. Depois disso é feita a pesquisa para se obter os conceitos que serão a base para a fabricação do equipamento. Em seguida é preciso realizar uma verificação em outras pesquisas já

existentes, a fim de checar se há protótipos já construídos que possam solucionar o problema levantado pela pesquisa.

A partir das pesquisas executadas nas etapas anteriores é proposto o protótipo para atender a demanda do trabalho. Em seguida são realizadas as etapas de construção e teste do equipamento. Finalmente, é feita a conclusão com os resultados dos testes e o conhecimento adquirido durante o projeto (DRESCH, 2015).

1.5 ORÇAMENTO

O valor máximo estipulado em orçamento para a construção do protótipo ficou em de R\$2.000,00. A relação das peças com os respectivos valores e as respectivas fontes foram inseridos no Quadro 1, apresentado abaixo.

Quadro 1 – Relação das peças.

Código	Material	Quantidade	Especificação	Valor unitário	Total	Fonte
1	Exaustor industrial	1	50cm	R\$ 800,00	R\$ 800,00	Caixa Equipe
2	Máquina de fumaça	1	peça	R\$ 254,00	R\$ 254,00	Empréstimo de terceiros
3	Canudo plástico	30	210 x 10 mm pacotes	R\$ 7,99	R\$ 239,70	Caixa Equipe
4	Eucatex chapa	10	m ²	R\$ 18,00	R\$ 180,00	Caixa Equipe
5	Madeira ripa bruta	12	m	R\$ 12,00	R\$ 144,00	Caixa Equipe
6	Tinta	3	Lata 900 ml	R\$ 45,00	R\$ 135,00	Caixa Equipe
7	Fita adesiva	1	Rolo 5 x 50 cm	R\$ 65,00	R\$ 65,00	Caixa Equipe
8	Cola de silicone	2	tubo 280 ml	R\$ 28,00	R\$ 56,00	Caixa Equipe
9	Dimmer	1	peça	R\$ 45,00	R\$ 45,00	Empréstimo de terceiros
10	Disjuntor bivolt	1	peça	R\$ 32,00	R\$ 32,00	Caixa Equipe
11	Parafuso	200	Auto atarraxante chata philips 5 x 60	R\$ 0,15	R\$ 30,00	Caixa Equipe
12	Cola de madeira	1	Lata 195g	R\$ 26,80	R\$ 26,80	Caixa Equipe
13	Porca sextavada	200	Zincada, 1/4 polegada	R\$ 0,12	R\$ 24,00	Caixa Equipe
14	Pincel	3	unidade	R\$ 6,43	R\$ 19,29	Caixa Equipe
15	Barra roscada	3	6,3 mm. Vara com 3 m	R\$ 6,15	R\$ 18,45	Caixa Equipe
16	Arruela lisa	200	Zincada, 1/4 polegada	R\$ 0,09	R\$ 18,00	Caixa Equipe
17	Cabo PP	2	m	R\$ 5,75	R\$ 11,50	Caixa Equipe
18	lixa de madeira	3	unidade	R\$ 2,50	R\$ 7,50	Caixa Equipe
19	Plugue 3 pinos	1	peça	R\$ 7,00	R\$ 7,00	Caixa Equipe
20	Anemômetro	1	peça	R\$ 0,00	R\$ 0,00	Empréstimo de terceiros
21	Asa mecânica	1	peça	R\$ 0,00	R\$ 0,00	Material descartado/Reciclagem
22	Placa arduino	1	peça	R\$ 0,00	R\$ 0,00	Material descartado/Reciclagem
23	Motor de passo byj28	1	peça	R\$ 0,00	R\$ 0,00	Material descartado/Reciclagem
24	Achrlilo	3	peça 50 x 50 cm	R\$ 0,00	R\$ 0,00	Material descartado/Reciclagem
25	Tela quadriculada pvc	1	m ²	R\$ 0,00	R\$ 0,00	Material descartado/Reciclagem
26	Decibelímetro	1	peça	R\$ 0,00	R\$ 0,00	Empréstimo de terceiros
					R\$ 2.113,24	

Fonte: A autoria própria, 2024

1.6 CRONOGRAMA

Para a devida organização do projeto, um cronograma foi previamente estabelecido, delimitado por demandas mais urgentes e menos urgentes, sendo que ambas são tratadas em reunião da equipe, onde são discutidos quais tarefas já foram

cumpridas, quando e quais os próximos passos, sendo que os mesmos já são adicionados ao cronograma com prazos. Demandas não realizadas são discutidas para a devida tratativa, onde, a depender da necessidade, um foco maior é dado para a mesma.

De acordo com o Tabela 1, que apresenta as atividades realizadas no período entre os meses de agosto e outubro de 2023. Já a Tabela 2, que apresenta a etapa da construção do protótipo, definindo o período de outubro de 2023 para o início com previsão de término da construção em março de 2024.

Tabela 1- Cronograma dos meses de agosto a outubro de 2023.

NÚMERO	TÍTULO DA TAREFA	RESPONSÁVEL	DATA DE INÍCIO	DATA DE CONCLUSÃO	DURAÇÃO EM DIAS	STATUS	Definição do projeto		
							12/08/2023 - 14/10/2023		
							AGOSTO	SETEMBRO	OUTUBRO
1	Definição do projeto TCC I								
1	Material para revisão bibliográfica	Equipe	12/08/23	19/08/23	7	Concluído			
1.1	Pesquisa bibliográfica	Equipe	12/08/23	19/08/23	7	Concluído			
1.2	Elaboração de proposta do protótipo	Equipe	15/08/23	29/08/23	14	Concluído			
1.3	Levantamento dos custos dos materiais	Equipe	15/08/23	25/08/23	10	Concluído			
1.4	Validação da proposta com o orientador	Equipe	29/08/23	30/08/23	1	Concluído			
1.5	Desenho técnico da proposta do protótipo	Matheus	15/08/23	30/08/23	15	Concluído			
1.6	Fundamentação teórica	Equipe	12/08/23	06/10/23	55	Concluído			
1.7	Apresentação Pré-banca	Equipe	13/10/23	14/10/23	1	Concluído			

Fonte: Autoria própria, 2024

Para a etapa da construção do protótipo, algumas atividades já foram iniciadas e estão representadas no quadro pelo status em andamento.

Tabela 2 - Cronograma do mês de novembro de 2023 ao mês abril de 2024

NÚMERO	TÍTULO DA TAREFA	RESPONSÁVEL	DATA DE INÍCIO	DATA DE CONCLUSÃO	DURAÇÃO EM DIAS	STATUS	Construção do protótipo			Testes do protótipo	
							14/10/2023 - 31/03/2024			01/04/2024 - 30/04/2024	
							NOVEMBRO	FEVEREIRO	MARÇO	ABRIL	
1	Definição do projeto TCC I										
2	Construção do protótipo TCC I e II										
2	Elaboração de manual de montagem	Equipe	14/10/23	31/03/24	169	Concluído					
2.1	Pré-montagem do Bocal de contração	Leonardo	14/10/23	15/11/23	32	Concluído					
2.2	Pré-montagem da Colmeia	Julia	14/10/23	15/11/23	32	Concluído					
2.3	Pré-montagem da Área de Teste	Matheus	14/10/23	15/11/23	32	Concluído					
2.4	Pré-montagem do Bocal Difusor	Danilo	14/10/23	15/11/23	32	Concluído					
2.5	Pré-montagem do Exaustor	Iandro	14/10/23	15/11/23	32	Concluído					
2.6	Pré-montagem do suporte	Equipe	14/10/23	15/11/23	32	Concluído					
2.7	Ensaio da montagem das seções	Equipe	01/02/24	28/02/24	27	Concluído					
2.8	Montagem do protótipo	Equipe	01/03/24	31/03/24	30	Concluído					
3	Testes do protótipo TCC II										
3.1	Teste de funcionamento geral	Equipe	01/04/24	30/04/24	29	Concluído					
3.2	Teste com anemômetro	Equipe	01/04/24	30/04/24	29	Concluído					
3.3	Teste com máquina de fumaça	Equipe	01/04/24	30/04/24	29	Concluído					
3.4	Teste com o Dimmer	Equipe	01/04/24	30/04/24	29	Concluído					
3.5	Teste com asa mecânica	Equipe	01/04/24	30/04/24	29	Concluído					
3.6	Teste com um decibelmetro	Equipe	01/04/24	30/04/24	29	Concluído					

Fonte: Autoria própria, 2024

A Tabela 3 apresenta as atividades na etapa final, quando serão realizados os testes com o protótipo utilizando alguns equipamentos para a mensuração do fluxo de ar gerado pelo túnel de vento. Em seguida, a elaboração de relatórios dos testes e a

apresentação do equipamento. A data prevista para a finalização está registrada no cronograma para o final do mês de maio de 2024.

Tabela 3 - Cronograma dos meses de abril a maio de 2024.

NÚMERO	TÍTULO DA TAREFA	RESPONSÁVEL	DATA DE INÍCIO	DATA DE CONCLUSÃO	DURAÇÃO EM DIAS	STATUS	Testes do protótipo		Fim do Projeto
							01/04/2024	30/04/2024	30/05/2024
							ABRIL		MAIO
1	Definição do projeto TCC I								
2	Construção do protótipo TCC I e II								
3	Testes do protótipo TCC II								
3.1	Teste de funcionamento geral	Equipe	01/04/24	30/04/24	29	Concluído			
3.2	Teste com anemômetro	Equipe	01/04/24	30/04/24	29	Concluído			
3.3	Teste com máquina de fumaça	Equipe	01/04/24	30/04/24	29	Concluído			
3.4	Teste com o Dimmer	Equipe	01/04/24	30/04/24	29	Concluído			
3.5	Teste com asa mecânica	Equipe	01/04/24	30/04/24	29	Concluído			
3.6	Teste com um decibelímetro	Equipe	01/04/24	30/04/24	29	Concluído			
4	Entrega do projeto TCC II								
4.1	Elaboração do desenvolvimento	Equipe	01/05/24	31/05/24	30	Concluído			
4.2	Elaboração da conclusão	Equipe	01/05/24	31/05/24	30	Concluído			
4.3	Entrega do projeto	Equipe	01/05/24	31/05/24	30	Concluído			

Fonte: Autoria própria, 2024

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para melhor compreensão do escoamento do ar ao redor de uma estrutura física, são realizados estudos e simulações para que seja validado os resultados de forma satisfatória. Uma forma prática de avaliação é através da construção de um túnel de vento, utilizando métodos experimentais para obter informações relevantes da interação do ar com um objeto ou estrutura qualquer. De acordo com Martins, Jabardo e Nader (2015), a otimização e segurança de projetos estruturais também é uma das justificativas do uso de túneis de vento. Portanto, esses túneis são ferramentas extremamente úteis na obtenção de informação para diferentes setores da engenharia e o estudo da mecânica dos fluidos é essencial para a sua construção.

2.1 CONCEITO DE TÚNEL DE VENTO

Kollross (2015) define o equipamento túnel de vento como “uma estrutura empregada na análise dos padrões de escoamento dos ventos em torno dos objetos sólidos, sendo estes mantidos estáticos na seção de testes, enquanto o ar é impulsionado no seu entorno”. Geralmente é composto por um formato geométrico retangular, longo comprimento e estreito em sua largura, onde o ar é solicitado a se mover em velocidades controladas. Isso permite estudar como o ar flui ao redor de modelos de aeronaves, veículos, edifícios ou outros objetos, fornecendo informações sobre a resistência do ar, a eficiência aerodinâmica e outras características relacionadas à fluidodinâmica.

Túneis de vento são amplamente utilizados na pesquisa e desenvolvimento de aeronaves, carros, esportes de alta velocidade e diversas outras aplicações de aerodinâmica. Eles consistem em uma combinação de dutos e um exaustor para disponibilizar um fluxo de ar na seção de testes. A vantagem dos túneis de vento é a possibilidade de utilizar modelos em escala reduzida, desde que o mesmo atenda às condições de semelhança dinâmica necessárias, isto é, materiais compostos, geometria e dimensões (FOX et al., 2011). Dessa forma, com a utilização do modelo em escala reduzida se tem um aumento na praticidade e uma diminuição dos custos do projeto, permitindo assim, análises precisas e confiáveis.

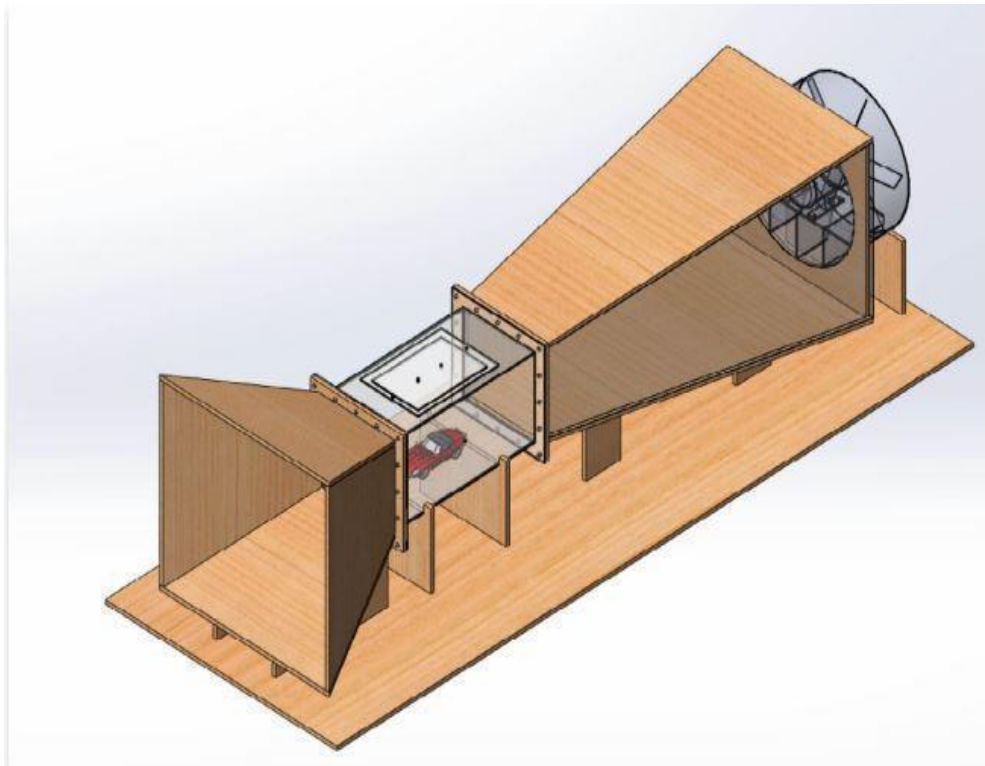
Os testes em túneis de vento são essenciais para diversos campos de pesquisa e nas engenharias, permitindo uma análise precisa do comportamento de objetos sob

diferentes condições de vento, velocidades e temperaturas. Segundo Matos e Araripe (2016) e Kollross (2015), os túneis de vento são divididos em duas categorias, de circuito aberto ou fechado.

Os sistemas de circuito aberto não recirculam o ar e são mais viáveis economicamente, pois eles são compostos por três estruturas principais: um bocal, uma seção de teste e um difusor. Já em um túnel de circuito fechado o ar é recirculado dentro do sistema, portanto, ele tem mais componentes e são sistemas complexos e caros. Em um túnel de circuito aberto o ar não circula no seu interior, normalmente são mais baratos e possibilitam os ensaios com equipamentos de combustão interna. Esse modelo possui algumas desvantagens, pois são muito barulhentos e são sensíveis ao ambiente, ou seja, o escoamento pode ser afetado pela configuração da sala na qual ele está alocado, isso é, sua região, a depender de condições do clima e temperatura.

A Figura 3 representa um modelo de túnel de vento de circuito aberto, onde é possível ver as suas três principais seções e a utilização de um exaustor para a propulsão do ar.

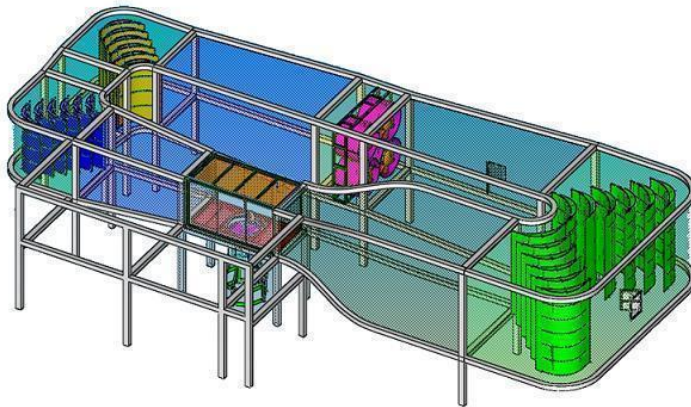
Figura 3 - Vista isométrica túnel de vento circuito aberto.



Fonte: Oliveira, Dalmolin, Haus, 2014

Já a Figura 4 representa um modelo de túnel de vento em circuito fechado, onde o fluxo de ar é recirculado em seu interior.

Figura 4 - Vista isométrica túnel de vento circuito fechado.



Fonte: Brasilsat, 2017

Em um túnel de vento de circuito fechado o ar se desloca pelo bocal, em seguida pela seção de testes, que se trata do local onde os objetos de estudos estarão posicionados, em um difusor e por fim o ventilador. A seção de testes é aberta quando não possui barreiras sólidas, e fechada quando possui paredes que delimitam a região.

A seção de testes do túnel de vento de circuito fechado é a região onde os objetos de estudos ou em avaliação irão se localizar, alguns segmentos se destacam nesses estudos:

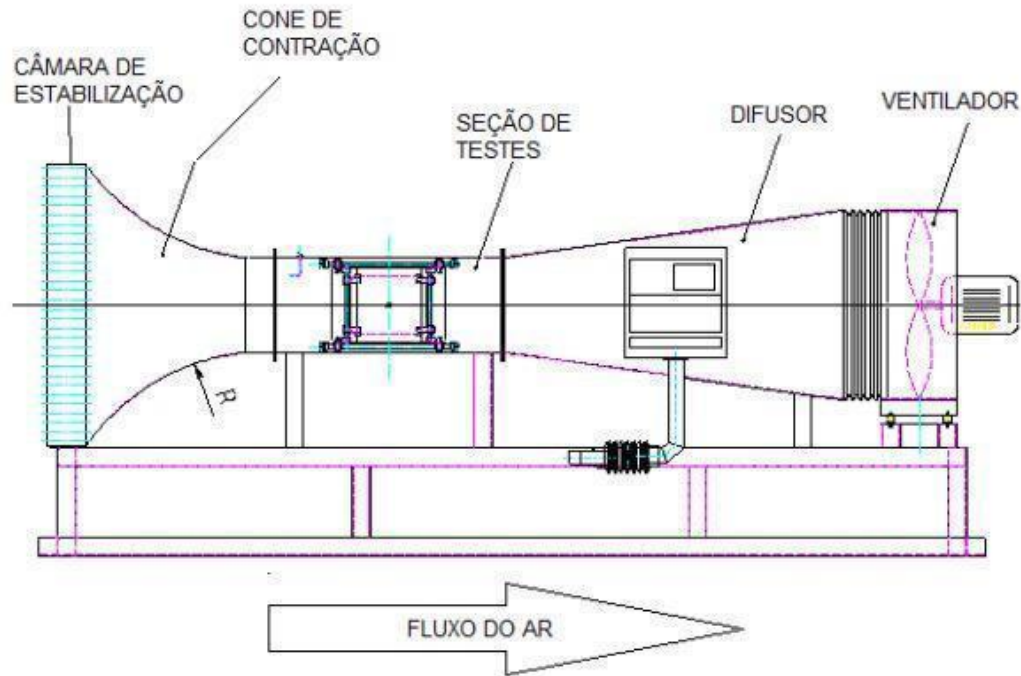
- a) aerodinâmica: o túnel de vento permite estudar como fluido se desloca ao redor de um objeto, fornecendo informações cruciais para o projeto de aeronaves, carros e até mesmo edifícios para melhorar eficiência e estabilidade;
- b) propriedade de materiais: o túnel de vento pode simular condições extremas, como ventos fortes, para avaliar a resistência e durabilidade de estruturas e materiais;
- c) desenvolvimento de protótipos: antes de construir um objeto em tamanho real, os engenheiros podem testar protótipos em tons de vento para identificar e corrigir problemas de design.

Alguns túneis de vento são usados para estudar a interação entre estruturas e ventos extremos, contribuindo para a construção de edifícios mais seguros contra furacões, tornados e tempestades.

A estrutura de um túnel de vento não é uniforme. Para Oliveira (2014) “A seção de contração é a parte mais crítica do projeto do túnel, pois tem o maior impacto na qualidade do fluxo de ar que chega à seção de teste”.

Cada seção do túnel de vento tem uma finalidade e proporciona um tipo de resultado na realização dos testes.

Figura 5 - Seções típicas de um túnel de vento.



Fonte: Martini et al., 2001

De acordo com Oliveira (2014) “os equipamentos com seções transversais reduzidas são frequentemente utilizados para pesquisas mais específicas e para fins acadêmicos”. Oliveira chama a atenção para a necessidade de se iniciar com a determinação das dimensões do túnel de vento que estão diretamente associadas aos testes que se pretendem realizar, assim como a velocidade máxima a ser atingida na seção de testes. As dimensões globais das demais seções dependem dessas definições, o que irá colaborar também na definição dos custos de construção do modelo.

Por fim, a seção chamada de difusor, que também segue uma proporção em relação às outras seções do equipamento. São os de circuito aberto os que contemplam as três seções mencionadas, tendo o fluxo de ar unidirecional como mostra a Figura 5 acima, iniciando pela parte de contração do ar, passando pela seção de testes e sendo direcionado para o difusor com a utilização de um exaustor que fica fixado na extremidade desta seção. É o exaustor o componente que promove o fluxo de ar dentro da estrutura do túnel de vento e que por sua vez tem interferência direta, sendo necessário o estudo do seu funcionamento desde a etapa inicial do projeto.

2.2 MECÂNICA DOS FLUIDOS

De acordo com Çengel e Cimbala (2015), a mecânica dos fluidos pode ser definida como “a ciência que trata do comportamento dos fluidos em repouso (estática dos fluidos) ou em movimento (dinâmica dos fluidos) e da interação entre fluidos e sólidos”. O equipamento túnel do vento tem a proposta da realização de testes para evidenciar essa interação do ar, fluido em movimento no estado gasoso, com os objetos sólidos. Conforme Lins (2018), “em um túnel de vento, a área de seção transversal varia ao longo do seu comprimento e essa característica causa uma variação na pressão e na velocidade do escoamento”. Ou seja, os diferentes materiais, suas formas e em especial a composição destes, têm influência sobre o comportamento do fluido em movimento e, a partir do estudo dessa interação e da aplicação dos conceitos da mecânica, que são possíveis de serem desenvolvidas as propostas de soluções para problemas de eficiência e desempenho de outros protótipos, como por exemplo uma réplica de aerogerador para o estudo da eficiência das pás ou da hélice.

Ainda de acordo com Çengel e Cimbala (2015), “A dinâmica dos gases trata do escoamento dos fluidos que sofrem mudanças de densidade significativas, como o caso do escoamento de gases em alta velocidade através de bocais”. Desta vez, a ciência em questão, considerada pelo autor está diretamente associada ao funcionamento do túnel do vento, onde, a partir da propulsão do ar que passa por câmaras de diferentes estruturas e formatos é possível o estudo da interação do fluido com os sólidos. Nesse ponto, o autor também apresenta o conceito de uma outra categoria, ou seja, o conceito da aerodinâmica, que trata do escoamento dos gases e que considera corpos como os de aeronaves e suas estruturas, hélices e pás, principalmente quando as interações ocorrem em altas ou baixas velocidades.

Conforme Nunes (2021), “os túneis de vento são ferramentas utilizadas para tratar de projetos que envolvam o escoamento de ar em torno de objetos (corpos) e as forças originadas desta interação”. Nunes continua informando que, a partir da utilização do túnel de vento é possível a medição de velocidades do ar e o campo de pressão que é formado na superfície dos objetos colocados em teste. Lins, (2018) simplifica um pouco ao afirmar que tais equipamentos “consistem de uma combinação de dutos e um ventilador para fornecer um fluxo de ar na seção de testes”

2.2.1 Arrasto e sustentação

De acordo com Tiburcio (2021), quando um corpo se move através de um fluido estacionário ou quando um fluido escoar passando por um corpo, o fluido exerce uma força resultante. A componente desta força resultante, que está paralela à velocidade da corrente livre é denominada força de arrasto. De maneira semelhante, a força de sustentação. Ainda de acordo com Tiburcio (2021) é a componente da força resultante que está perpendicular à corrente livre.

Sobre os conceitos de aerodinâmica, que contribuem diretamente para a melhor eficiência e desempenho das hélices utilizadas no túnel de vento, os princípios de arrasto e sustentação são trabalhados a partir do ângulo do bordo de ataque, ou inclinação das pás. De acordo com ELGER (2019), “coeficiente de arrasto é um parâmetro que caracteriza a força de arrasto associada a determinada forma de corpo”, e, coeficiente de sustentação ou coeficiente de ascensão, “é um parâmetro que caracteriza a sustentação associada a um corpo”. Elger ainda traz um exemplo, considerando quando se trata de aeronaves, e explica que “uma asa em um grande ângulo de ataque terá um alto coeficiente de sustentação, enquanto uma asa com um ângulo de ataque igual a zero terá um coeficiente de sustentação baixo ou igual a zero”. Essa definição ratifica a ideia de que quanto maior o ângulo de ataque, maiores serão as forças atuantes que incidem sobre as pás.

2.2.2 Camada limite

Outro conceito considerado na mecânica dos fluidos e que tem grande influência no desempenho dos modelos, assim como, grande influência na simulação de testes com protótipos é o da camada limite. Conforme Queiroga (2022), “a camada limite é uma fina região adjacente à superfície, onde o escoamento é retardado pela influência da fricção entre o sólido e o fluido”, ou seja, essa fina região é consequência das interações que acontecem entre o fluxo do ar, quando o fluido é gasoso, e as rugosidades da superfície da estrutura por onde esse fluxo está percorrendo. Essa interação será fundamental para os cálculos da perda de carga ou simplesmente perda da velocidade do fluxo de ar que será utilizado no interior do túnel de vento e suas paredes internas, local da formação da camada limite.

De acordo com Lins (2018), na região da formação da camada limite, “devido à condição de não escorregamento, a velocidade na parede é zero, aumentando à medida que se afasta da mesma”. Esses conceitos devem ser considerados durante a realização dos testes, assim como as características da seção transversal das respectivas seções do túnel de vento.

2.2.3 Tipos de escoamento

Em torno de 1880 Osborne Reynolds, através da realização de experimentos, descobriu que o escoamento depende da razão entre as forças inerciais e as forças viscosas. Atualmente, o número de Reynolds é o parâmetro adimensional mais utilizado para determinar os tipos de escoamento, pois serve para avaliar tanto em seções como também em torno de objetos. Ainda de acordo com Çengel e Cimbala (2015) um escoamento é considerado:

- a) laminar quando o número de Reynolds ≤ 2300 ;
- b) de transição quando $2300 \leq \text{Reynolds} \leq 4000$;
- c) turbulento quando o número de Reynolds ≥ 4000 .

2.2.4 Número de Reynolds

Quando se trabalha com fluidos é preciso fazer uma análise mecânica deles utilizando variáveis como o número de Reynolds. Esse dado adimensional difere os regimes de fluxo entre laminar e turbulento, e é encontrado a partir da razão entre forças inerciais e forças viscosas (COELHO, 2016, p. 104-106).

Segundo Bistafa (2016) o número de Reynolds determina a universalidade da ocorrência desses movimentos, independentemente do tipo de fluido e da velocidade. Sabendo o número de Reynolds é possível saber a natureza do escoamento do fluido.

Sendo o movimento laminar, um movimento mais uniforme e sem oscilações. Já o movimento de transição, por ser um movimento intermediário, apresenta oscilações e surtos irregulares de redemoinhos. Por fim, o movimento turbulento é um movimento que apresenta uma mistura de redemoinhos. O número de Reynolds pode ser determinado pela equação 1.

$$Re_{\square} = \frac{\rho VL}{\mu} \quad (1)$$

Onde:

Re_{\square} = número de Reynolds

ρ = massa específica

μ = viscosidade do fluido

V = velocidade do escoamento

L = comprimento do escoamento

2.2.5 Número Mach

O número de Mach é um parâmetro adimensional usado para analisar os escoamentos compressíveis. É determinado pela razão entre a velocidade do fluido e a velocidade do som no mesmo fluido com o mesmo estado termodinâmico. Como pode ser observado na equação 2 (CENGEL, 2012, p. 50).

$$Ma = \frac{V}{c} \quad (2)$$

Onde:

Ma = Número de Mach

V = Velocidade de escoamento

c = Velocidade do som

2.2.6 Perda de Carga

Segundo Fox, Pritchard e Mcdonald (2016), a perda de carga representa a transformação de energia mecânica em energia térmica devido aos efeitos de atrito do sistema. No túnel de vento, essa perda de carga ocorre devido ao atrito do fluido viscoso sobre as paredes dos componentes internos e superfícies de corpos sólidos.

A perda de pressão total de um sistema pode ser descrita como um somatório das perdas em cada componente do túnel, como mostra a equação 3 a seguir:

$$\Delta P_{total} = \sum_i (\Delta P_i) = \sum_i (K_i \frac{\rho V_i^2}{2}) \quad (3)$$

Onde:

ΔP_i = a perda de pressão de cada componente do túnel

K_i = o coeficiente de perda de carga

$\rho V_i^2 / 2$ = pressão dinâmica de cada iteração

ΔP_{total} = queda total de pressão de um circuito.

2.3 ESPECIFICAÇÕES

São apresentadas a seguir as especificações individuais das seções, que compõem o túnel de vento e as equações utilizadas para a determinação das respectivas dimensões.

2.3.1 Bocal de contração

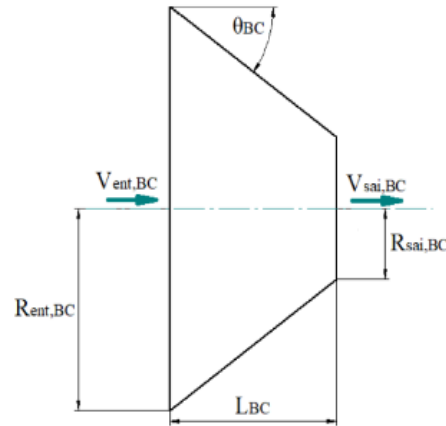
Representa a seção que é localizada antes da seção de testes conforme a Figura 6. De acordo com Brasiliano (2022), essa seção é responsável por uniformizar o fluxo de ar, garantindo que este alcance uma velocidade para a realização dos ensaios. Essa parte do túnel de vento realiza a contração do fluxo de ar de acordo com a sua própria estrutura, tendo um raio de entrada do fluxo em uma das extremidades e um raio de saída que mantêm entre si uma proporcionalidade para a redução dos atritos ou perda de carga, decorrentes do atrito com as paredes. De acordo com Lins (2018), “o fluido é acelerado ao longo do bocal de contração à medida que a área e a pressão diminuem”. Ocorre um aumento da velocidade média que vem da câmara de estabilização em torno de 6 a 10 vezes (Barlow;Rae; Pope,1999).

Ainda de acordo com Lins (2018), “não existe um método completamente satisfatório para projetos de um bocal de contração e muitos foram dimensionados apenas por observações visuais”, ou seja, apesar de existirem equações que são utilizadas para o cálculo do dimensionamento do bocal de contração, assim como a proporcionalidade entre o raio de entrada e saída, ou ainda a proporção com as demais seções do túnel de vento, ainda são necessários estudos para a definição das medidas para a obtenção dos melhores resultados.

A figura a seguir representa um bocal de contração, onde $R_{ent,bc}$ e $R_{sai,bc}$ são os raios hidráulicos de entrada e saída do bocal de contração. $V_{ent,bc}$ e $V_{sai,bc}$ são as

velocidades de entrada e saída do bocal; θ_{bc} é o ângulo cônico do bocal convergente e L_{bc} o comprimento:

Figura 6 – Estrutura bocal de convergente



Fonte: Tirbucio e Rizzo, 2021

O ângulo cônico do bocal convergente pode ser calculado a partir da equação 4:

$$\theta_{bc} = \arctan \frac{R_{ent} - R_{sai,bc}}{L_{bc}} \quad (4)$$

Onde:

θ_{bc} = ângulo cônico do bocal convergente

R_{ent} = raio hidráulico de entrada

$R_{sai,bc}$ = raio hidráulico de saída

L_{bc} = comprimento do bocal

A equação 4 pode ser definida em função da razão de área entre a entrada e saída do bocal, Ar_{bc} , definida como:

$$Ar_{bc} = \frac{A_{entrada}}{A_{saida}} = \frac{R_{ent,bc}^2}{R_{sai,bc}^2} \quad (5)$$

Onde:

Ar_{bc} = razão entre as áreas

$A_{entrada}$ = área de entrada

$A_{saída}$ = área de saída

Desta forma, deixando a equação 5 em termos da razão de área e do diâmetro hidráulico da seção de teste, encontraremos a equação 6:

$$\begin{aligned} \theta_{bc} &= & (6) \\ \arctan \arctan \frac{R_{sai,bc} \sqrt{Ar_{bc}} - R_{sai,bc}}{L_{bc}} &= \\ \arctan \left(\frac{D_{sai,bc}}{2} \frac{\sqrt{Ar_{bc}} - 1}{L_{bc}} \right) & \\ \therefore \theta_{bc} &= \arctan \frac{\sqrt{Ar_{bc}} - 1}{\frac{L_{bc}}{D_{sai,bc}}} \end{aligned}$$

Onde:

$D_{sai,bc}$ = diâmetro hidráulico de saída do bocal convergente

Ar_{bc} = razão entre as áreas

$A_{entrada}$ = área de entrada

$A_{saída}$ = área de saída

L_{bc} = comprimento do bocal

$R_{sai,bc}$ = raio hidráulico de saída

A perda de carga do bocal pode ser dada pela equação 7, de acordo com Barlow, Rae e Pope (1999):

$$K_{bc} = f_{a,bc} \frac{L_{bc}}{D_{h,bc}(x)^5} d \left(\frac{x}{L_{bc}} \right) \quad (7)$$

Onde:

$f_{a,bc}$ = fator de atrito médio entre a entrada e saída do bocal

L_{bc} = comprimento do bocal convergente

$D_{h,bc}$ = diâmetro hidráulico da seção de teste

$D_{h,bc}(x)$ = diâmetro hidráulico em um dado x do bocal convergente

$d \left(\frac{x}{L_{bc}} \right)$ = a razão do comprimento x pelo comprimento do bocal, para que o

limite de integração possa ser de 0 a 1.

2.3.2 Seção de estabilização

Segundo Pereira (2011), o objetivo da câmara de estabilização é diminuir as turbulências do escoamento do fluido antes que entre no bocal convergente. Para isso acontecer é necessária uma colmeia e uma várias telas. Segundo Prandtl (1933, p. 11, apud. BARLOW; RAE; POPE, 1999, p. 90), “uma colmeia é um dispositivo de guia no qual os filamentos individuais de ar são conformados em paralelo”. Conforme Figura 7, é possível a visualização do formato geral e dos orifícios da colmeia, ou seja, os filamentos individuais por onde o ar passa, da parte anterior, do bocal de contração para a seção de testes.

Para a construção da colmeia é necessário considerar que, a sua estrutura na qual o ar irá passar, vai representar mais um equipamento na redução da pressão ou perda de carga. Os parâmetros da colmeia e dos equipamentos utilizados para a sua construção devem ser avaliados para que essa perda de carga seja a menor possível, porém, que ao mesmo tempo contribua significativamente para a conformação do ar, garantindo que ao chegar na seção de testes esteja de forma laminar, o que aumenta a qualidade dos testes que serão propostos nesta seção.

Figura 7 – Colmeia.



Fonte: Tiburcio, 2021

Os parâmetros que definem a geometria de uma colmeia são o comprimento (L_c), o diâmetro hidráulico de uma única célula ($D_{h,c}$) e a porosidade (β_c), onde o

último é definido como a razão entre a área da seção transversal real de escoamento e a área total da seção transversal, como na equação 8 a seguir (PEREIRA, 2011):

$$\beta_c = \frac{A_{escoamento}}{A_{total}} \quad (8)$$

Onde:

β_c = porosidade

$A_{escoamento}$ = área da seção transversal real de escoamento

A_{total} = área total da seção transversal

Para se estimar o diâmetro hidráulico das células, pode-se utilizar a consideração de que o escoamento após a colmeia deve ser laminar, onde segundo Çengel e Cimbala (2012), equivale a um número de Reynolds em torno de $Re_h \lesssim 2000$. Sendo assim, o diâmetro hidráulico máximo das células de uma colmeia para um certo projeto de túnel de vento pode ser calculado a partir das equações 9, 10 e 11 a seguir, utilizando a equação do número de Reynolds (1) descrita anteriormente, com V sendo a velocidade média da seção:

$$Re_c = \frac{\rho V D_{h,c}}{\mu} \quad (9)$$

$$D_{h,cmax} = \frac{2000\mu}{\rho V} \quad (10)$$

$$D_{h,c} = \frac{Re_c \mu}{\rho V} \quad (11)$$

Onde:

$D_{h,c}$ = diâmetro hidráulico das células

$D_{h,cmax}$ = diâmetro hidráulico máximo das células de uma colmeia

Re_c = número de Reynolds da colmeia

ρ = massa específica

μ = viscosidade do fluído

V = velocidade do escoamento

L = comprimento do escoamento

Segundo Pereira (2011), dois critérios devem ser seguidos para colmeias utilizadas em túneis de vento: a razão de aspecto deve ser $6 \leq L_c/D_{h,c} \leq 8$; e a porosidade deve ser $\beta c \geq 0.8$.

O coeficiente de perda de carga causada pela colmeia pode ser calculado a partir da equação 12, segundo Idel'chik (1966):

$$K_c = f_{a,b} \left(\frac{L_c}{D_{h,c}} + 3 \right) \left(\frac{1}{\beta c} \right)^2 + \left(\frac{1}{\beta c} - 1 \right)^2 \quad (12)$$

Onde:

$f_{a,c}$ = fator de atrito para um tubo de superfície lisa

D_h = rugosidade superficial do material

O valor de $f_{a,c}$ é dado a partir da equação 13:

$$f_{a,c} = 0,375 \left(\frac{e}{D_{h,c}} \right)^{0,4} Re_e^{0,4} \rightarrow \text{para } Re_e \leq 275 ; 0,214 \left(\frac{e}{D_{h,c}} \right)^{0,4} \rightarrow \text{para } Re_e > 275 \quad (13)$$

Onde:

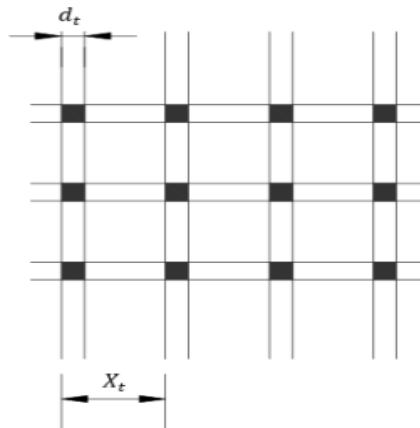
$f_{a,c}$ = fator de atrito para um tubo de superfície lisa

$D_{h,c}$ = rugosidade superficial do material colmeia

Re_e = número de Reynolds

Falando das telas, segundo Barlow, Rae e Pope (1999) elas são empregadas para livrar o equipamento de ventilação de particulados e outras impurezas do ar, além de manipular a divisão do fluido em difusores grandes angulares e controlar a turbulência do fluxo na entrada do bocal convergente. Conforme Figura 8, um exemplo da esquematização de uma tela e a indicação dos aspectos para a sua construção em relação aos espaços entre os fios.

Figura 8 – Tela.



Fonte: Tiburcio, 2021

Uma tela é definida por dois aspectos: o diâmetro do fio (d_t), e a distância entre fios (x_t), onde o inverso do último mostra a densidade da malha de uma tela $\rho_t = 1/x_t$.

Dois parâmetros simples são utilizados para o cálculo de perda de carga de uma tela, que são a porosidade (β_t) e o número de Reynolds do fio $Re_t = \rho V d_t / \mu$. A solidez da tela, $\sigma_t = 1 - \beta_t$, é adicionado em algumas literaturas para tornar simples o equacionamento (BARLOW; RAE; POPE, 1999). A porosidade de uma tela pode ser calculada a partir da equação 14:

$$\beta_t = (1 - d_t \rho_t)^2 \quad (14)$$

Onde:

β_t = porosidade da tela

ρ_t = densidade malha da tela

d_t = diâmetro do fio da tela

De acordo com McKinney e Scheiman (1981), malhas finas apresentam melhores resultados quanto a diminuição de turbulência, porém Mehta e Bradshaw (1979) recomendam que pelo menos uma tela deve ter porosidade $\beta_t \geq 0,57$, uma vez que telas muito finas podem gerar oscilação no escoamento. Segundo Barlow, Rae e Pope (1999), a equação 15 a seguir determina o coeficiente aproximado de perda de carga para uma tela:

$$K_t = K_{mesh} K_{rest} + \frac{\sigma_t^2}{\beta_t^2} \quad (15)$$

Onde:

K_t = coeficiente perda de carga da tela

K_{mesh} = fator de malha

K_{rest} = coeficiente de perda de carga da tela com relação ao número de Reynolds

σt = solidez da tela

Ainda conforme os autores acima, o fator de malha K_{mesh} é empregado para distinguir se o fio é liso ou rugoso, ou ainda indicar de qual material é construído, assim como informam que são definidos alguns valores para o fator: 1,0 para fios de metais novos, 1,3 para outros fios de metais e 2,1 para fios de seda.

O equacionamento do outro fator, (K_{re}) dependerá do valor de Reynolds do fio, como mostrado na equação 16:

$$K_{re} = \begin{cases} 0,785 \left(1 - \frac{Re_t}{354} \right) + 1,01 & \rightarrow \text{para } 0 \leq Re_t < 400; \\ 1,0 & \rightarrow \text{para } Re_t > 400 \end{cases} \quad (16)$$

Onde:

Re_t = número de Reynolds para tela

K_{re} = perda de carga Reynolds do fio

Para telas de segurança, o número de Reynolds de acordo ao diâmetro do fio (d_t), chega no máximo um pouco maior que 1000. Para telas com características de redução de turbulência, o número de Reynolds fica entre 70 a 300 (BARLOW; RAE; POPE, 1999).

Segundo Barlow, Rae e Pope (1999), com a utilização de várias telas, a perda de pressão total será a soma das perdas de cada tela individualmente. Além disso, a distância esperada entre telas deve ser maior que 30 vezes a distância entre fios da malha, ($30X_t$), ou próximo a 500 vezes o diâmetro do fio, ($500d_t$).

Para saber a eficiência de uma tela, podemos utilizar o conceito de fator de redução de turbulência. De acordo com Taylor e Batchelor (1947), o fator de redução representa a turbulência do escoamento com modificadores de fluxo, neste caso a tela, dividido pela turbulência do escoamento sem estes modificadores. Além disso, ele possui alteração nos sentidos normal e paralelo da tela. Ele pode ser calculado com as equações 17 e 18:

$$f_{rt,u} = \frac{1 + f_{rt,v} - f_{rt,v}K_t}{1 + f_{rt,v} + K_t} \quad (17)$$

$$f_{rt,v} = \frac{1,1}{\sqrt{1 + K_t}} \quad (18)$$

Onde:

$f_{rt,u}$ = apresenta o fator de redução de turbulência com relação ao sentido normal a tela

$f_{rt,v}$ = fator de redução de turbulência em relação ao sentido paralelo a tela.

Barlow, Rae e Pope (1999) afirmam ainda que o fator de redução turbulência de um grupamento de telas será a multiplicação dos fatores de cada uma.

Entretanto, a existência de telas em um escoamento leva a uma perda de velocidade no sentido paralelo à tela. O fator de redução de turbulência também pode ser aplicado para estimar esta redução de velocidade, a partir das equações 19, 20 e 21 (TAYLOR; BATCHELOR, 1947):

$$U_1 = f_{rt,u}U_2 \quad (19)$$

$$V_1 = f_{rt,v}V_2 \quad (20)$$

$$\emptyset = f_{rt,v}\theta \quad (21)$$

Onde:

U_1 = fator de redução de turbulência

V_1 = fator de redução de velocidade

$f_{rt,u}$ = apresenta o fator de redução de turbulência com relação ao sentido normal da tela.

$f_{rt,v}$ = fator de redução de turbulência em relação ao sentido paralelo a tela.

2.3.3 Seção de testes

A seção de testes, segundo Vincendo (2014), é a região no túnel de vento, em que se observa o deslocamento do ar em torno do objeto de testes, ou melhor, será observado o escoamento do fluido a saber, o ar, em torno do objeto que será submetido aos estudos aerodinâmicos. Alguns materiais transparentes como o acrílico são escolhidos para a construção da seção de testes, justamente para que se tenha uma melhor observação do escoamento. Geralmente, a região feita de acrílico fica posicionada na lateral da seção de testes para a observação do comportamento do objeto de estudo. É a seção do túnel de vento cuja a qual, a partir das suas dimensões, serão determinadas as dimensões de todo o restante do túnel de vento. Nesta seção também podem ser instalados instrumentos capazes de quantificar as forças envolvidas atuantes sobre o objeto de estudo. Após a definição das dimensões do protótipo do túnel de vento e também da velocidade pretendida na seção de testes, define-se as dimensões das demais seções. Deve ser considerado o limite de segurança de no máximo 80% da largura da seção de testes para o tamanho dos objetos a serem testados, assim como para a altura desses objetos (OLIVEIRA; DALMOLIN; HAUS, 2015; VINCENSI, 2014).

Ainda de acordo com Oliveira (2014), outra preocupação é a redução da turbulência gerada quando se trabalha com o ar, buscando-se uma conformidade no fluxo para a realização dos testes no túnel de vento. Isso ocorre quando se pega um grande volume de ar com baixa velocidade e se reduz a um baixo volume de ar com alta velocidade.

Oliveira (2014) pontua que, “a seção de teste é a área em que as medições e observações do escoamento do fluido em torno do objeto de estudo são realizadas”. Carminatti e Konrath (2019), afirmam que o túnel de vento é “uma estrutura empregada na análise dos padrões de escoamento dos ventos em torno de objetos sólidos”. É na seção de testes que os objetos são mantidos em uma determinada posição e estáticos, enquanto a partir do funcionamento do túnel de vento, um fluxo de ar é propulsado ao redor dos objetos, sendo o resultado da interação do fluxo de ar com os objetos, o produto da análise e estudo de tais padrões, como exemplificado na Figura 9. Para Nunes (2021) “uma vez estabelecidas as dimensões da seção de testes e a respectiva velocidade máxima, as outras partes podem ser dimensionadas”.

O dimensionamento da seção de testes de um túnel de vento demanda considerar alguns fatores, incluindo o tipo dos testes a serem realizados, a escala dos modelos e os objetivos a serem alcançados, específicos do projeto. Em relação às dimensões da seção de testes, a primeira consideração é o tamanho dos equipamentos que serão testados no túnel de vento. Isso influenciará o tamanho da seção de testes, por exemplo, se o objetivo for o de testar aeronaves em escala reduzida, uma seção de testes precisará ser grande o suficiente para acomodar esses equipamentos de forma segura.

As velocidades pré-estabelecidas de deslocamento do ar na seção de testes é fator fundamental no dimensionamento da seção de testes, pois nela será considerado a dimensão correta do mesmo, sendo que a medida que a velocidade de deslocamento for maior, também será as dimensões da seção de teste, isso acarreta também na potência e resistência dos materiais. Fatores como os instrumentos devem ser analisados, ou seja, a instrumentação consiste em sensores de pressão por exemplo. A seção de testes deve ser projetada de forma que acomode os componentes de leitura de dados.

O monitoramento do ambiente no qual o túnel de vento é utilizado é necessário. Variações de temperatura e pressão, ou seja, condições climáticas, podem afetar os resultados dos testes e devem ser consideradas de acordo com cada região do país. Variações severas de temperatura podem ser indesejáveis e podem afetar o isolamento térmico, assim como a ventilação do ambiente que é outro aspecto a ser observado, principalmente os efeitos na seção de testes.

Figura 9 – Exemplo de seção de Testes.



Fonte: Poder Aéreo, 2021

Um fator determinante no dimensionamento da seção de testes no túnel de vento é o orçamento disponível. Projetos de túneis de vento podem ter custos elevados, sua estrutura, componentes, dispositivos eletrônicos, e o dimensionamento da seção de testes deve estar alinhado com o orçamento disponível. A seção de testes é um dos pontos iniciais de um projeto de túnel de vento, onde a velocidade local do vento e a qualidade do escoamento são os dois pontos de partida para o seu dimensionamento (AHMED, 2013).

Para uma seção transversal constante, o coeficiente de perda de carga pode ser obtido utilizando a equação 22 a seguir:

$$K_{st} = f_{a,st} \frac{L_{st}}{D_{h,st}} \quad (22)$$

Onde:

K_{st} = coeficiente de perda de carga

$f_{a,st}$ = fator de atrito

L_{st} = comprimento

$D_{h,st}$ = diâmetro hidráulico da seção

Barlow, Rae e Pope (1999) dizem que, para tubos lisos com um alto número de Reynolds, pode-se utilizar a lei universal de Pradtl para definir o fator de atrito, como na equação 23:

$$\frac{1}{\sqrt{f_{a,st}}} = 2 \log_{10}(Re_{st} \sqrt{f_{a,st}}) - 0,8 \quad (23)$$

$$\therefore f_{a,st} = [2 \log_{10}(Re_{st} \sqrt{f_{a,st}}) - 0,8]^2$$

Onde:

Re_{st} = número de Reynolds seção de testes

$f_{a,st}$ = fator de atrito

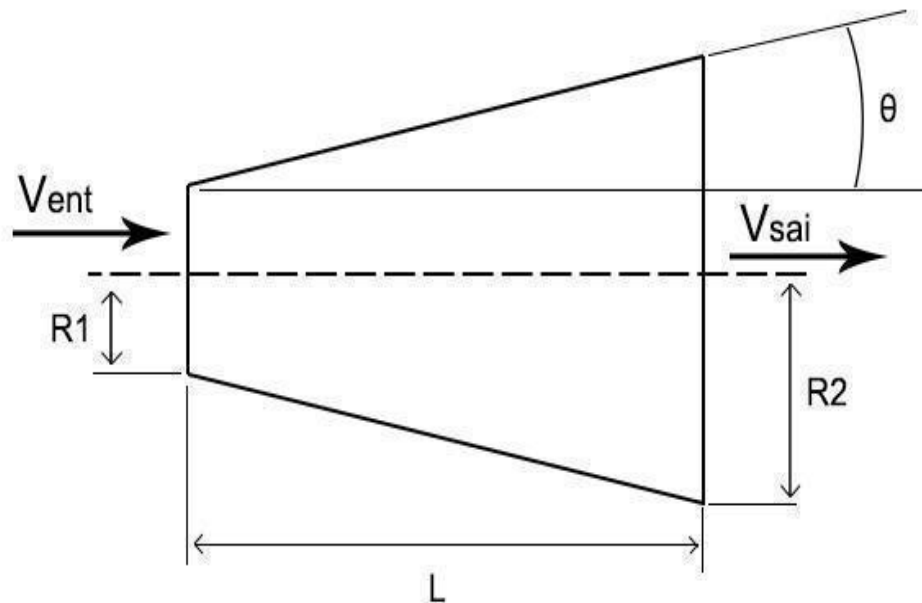
2.3.4 Bocal Difusor

A seção de difusor, que também pode ser chamado de bocal divergente, possui o objetivo de reduzir a velocidade do escoamento que vem da seção de teste com o

mínimo de perda possível. Geralmente, é requerido que a velocidade seja reduzida na menor distância possível sem que ocorra a separação do fluxo (BARLOW; RAE; POPE, 1999).

Ainda de acordo com Barlow, Rae e Pope (1999) o projeto dos bocais é sensível a erros, que podem causar separação da camada limite que podem ser intermitentes ou estáveis. Essas separações podem gerar problemas como vibrações, oscilação da carga imposta no ventilador, oscilação na velocidade do ar na seção de teste e aumento das perdas de carga.

Figura 10 - Representação do difusor.



Fonte: Autoria própria, 2023

A geometria do difusor é baseada na Figura 10 acima, onde $R1$ e $R2$ são os raios hidráulicos de entrada e saída do bocal, respectivamente. V_{ent} e V_{sai} são as velocidades de entrada e saída do bocal. θ o ângulo cônico do bocal e L o comprimento.

De acordo com Barlow, Rae e Pope (1999), o ângulo cônico do difusor pode ser calculado através da equação 24:

$$\theta = \arctan \left(\frac{V_{sai} - V_{ent}}{L} \right) \quad (24)$$

Onde:

V_{sai} = Velocidade de saída do difusor

V_{ent} = Velocidade de entrada difusor

L = comprimento difusor

A equação 24 ainda pode ser dada em função da razão de área entre entrada e saída do bocal, resultando na equação 25:

$$A_r = \frac{A_{saída}}{A_{entrada}} = \frac{V_{saída}^2}{V_{entrada}^2} \quad (25)$$

Onde:

A_r = razão entre as áreas do difusor

$A_{saída}$ = área de saída

$A_{entrada}$ = área de entrada

$V_{saída}^2$ = velocidade de saída

$V_{entrada}^2$ = velocidade de entrada

De acordo com Mehta e Bradshaw (1979), a razão de área da equação 26 varia entre 2 a 5, e o ângulo cônico da equação 25 não deve passar de 5 graus. É importante manter esses parâmetros para permitirem uma recuperação de pressão mais suave. Ainda é de igual importância que exista um grau razoável de estabilidade do fluxo, do contrário, a recuperação de pressão vai tender a variar com o tempo, e como consequência disso a velocidade de escoamento do túnel também se neste caso a potência fornecida para deslocamento do ar for constante.

De acordo com Barlow, Rae e Pope (1999), o difusor é sensível às variações ocorridas do escoamento do ar que vem da seção de teste. Conseqüentemente, é difícil encontrar valores para o coeficiente de perda de carga, K_{dif} de forma precisa, porém, o mesmo pode ser encontrado de forma empírica, visto que pode ser formado através da soma relacionado ao atrito, K_f , e o coeficiente relacionado à expansão do fluido, K_{ex} , conforme a equação 26:

$$K_{dif} = K_f + K_{ex} \quad (26)$$

Onde:

K_{dif} = perda de carga no difusor

K_f = perda de carga fator de atrito

K_{ex} = perda de carga expansão do fluido

Considerando que o fator de atrito ao longo da parede do difusor e a densidade do fluido seja constante, podemos então utilizar a equação 27 a seguir para definir a perda relacionada ao atrito. Ainda conforme os autores Barlow, Rae e Pope (1999), o fator de atrito dessa equação é dada por uma seção de área constante imaginária utilizando o número de Reynolds do bocal de entrada do difusor.

$$K_f = \frac{f_a}{8s \sin \theta} \quad (27)$$

Onde:

K_f = perda de carga fator de atrito.

f_a = seção de área constante imaginária.

Já a perda relacionada à expansão do fluido é também um resultado empírico, dado pelo produto da função de equivalência do ângulo cônico, K_e , que depende da forma da seção transversal, que por sua vez, envolve a razão da área do difusor, como é mostrado na equação 28 a seguir:

$$K_{ex} = K_e(\theta) \left(\frac{A_r - 1}{A_r} \right)^2 \quad (28)$$

Onde:

K_{ex} = perda de carga expansão do fluido

K_e = coeficiente de perda de carga de equivalência do ângulo cônico

As funções de equivalência do ângulo cônico para uma área circular e quadrada do difusor, pelos resultados de Eckert, Mort e Pope (1976), são utilizadas da seguinte forma conforme a equação 29:

$$K_e(\text{círculo}) = \{ \text{para } 0 < \theta < 1,5^\circ \rightarrow 0,1033 - 23,8930 \times 10^{-3} \theta \}$$

$$K_e(\text{quadrado}) = \{ \text{para } 0 < \theta < 1,5^\circ \rightarrow 96,2274 \times 10^{-3} - 4,1516 \theta \}$$

(29)

Onde:

$K_e(\text{círculo})$ = perda de carga equivalente ângulo cônico área circular

$K_e(\text{quadrado})$ = perda de carga equivalente ângulo cônico área quadrada

2.3.5 Hélice

De acordo com Rocha (2019) “a hélice é responsável por fornecer tração a uma aeronave, movimentando certa massa de ar na mesma direção de impulsão da aeronave, mas em sentido contrário”. Para Cypriano (2014), “a hélice é o aparato mais comum dos sistemas propulsivos existentes, e em geral, o mais eficiente”. A hélice presente no exaustor do túnel de vento é o componente responsável pela propulsão do fluxo de ar que é admitido na seção de contração, fluxo de ar que passa em seguida pela seção de testes e vai até o difusor, sendo esse fluxo de ar o produto a ser obtido com a construção do protótipo do túnel de vento.

Para o dimensionamento das hélices, sejam para aeronaves, ventiladores ou exaustores, alguns conceitos são considerados, como por exemplo os cálculos dos esforços e a geometria das pás, além das demais características para a utilização consciente, conforme citado por Rocha (2019). Observou também que, “as hélices consistem em pás interligadas a um cubo central, que por sua vez é conectada a um eixo de transmissão de potência” Rocha (2019). Além disso, continua informando que, “quando este conjunto proporciona rotação à hélice, as pás passam a se comportar como asas rotativas, possuindo baixa pressão no dorso da pá e alta pressão na face”.

Outro ponto importante é o perfil aerodinâmico das hélices. De acordo com Cypriano (2014), “o perfil aerodinâmico de um hélice se assemelha ao de uma asa, gerando um valor de arrasto e sustentação”. Considerando a estrutura imóvel de um túnel de vento, a força resultante será observada pelo deslocamento da massa de ar, dentro da estrutura do túnel, impulsionada pelas do exaustor, fixado na extremidade do difusor.

2.3.5.1 Partes que compõem as hélices

De acordo com Rocha (2019) a pá é o elemento que gera sustentação na hélice e que está presa ao cubo, que representa o centro da hélice, sendo nomeada de raiz a região da pá que fica próxima ao cubo. O cubo serve de mecanismo de fixação das pás. Em seguida Rocha (2019) descreve os bordos de ataque, área da pá que entra em contato inicial com o ar e o bordo de fuga, representado pela região final do contato do fluxo de ar com a pá.

Outro conceito relacionado às pás é a corda, que representa a medida entre os bordos, a ponta, sendo a extremidade da pá oposta ao cubo. O diâmetro da pá, que representa a circunferência ao girar a pá, medida pela sua ponta e o passo. Em relação ao passo, Rocha (2019) afirma que “é o deslocamento que uma hélice proporciona no sentido do seu eixo de rotação, ao completar uma revolução”. Rocha (2019) continua e faz uma comparação do passo de uma hélice ao aperto ou avanço dado por uma volta de um parafuso, ao ser girado.

Para Leandra (2017), o passo ou também chamado de ângulo da pá na parte do bordo de ataque, quando “com inclinação de 10° no sentido anti-horário(positivo) as pás produzem um deslocamento de ar vertical ascendente, função exaustor”. Leandra continua informando que para maiores inclinações, as forças atuantes da interação com o fluido geram sobrecarga ao motor, afetando negativamente o seu desempenho.

2.4 INSTRUMENTAÇÃO

Os equipamentos considerados para a realização dos testes com o túnel de vento devem ser capazes de identificar as diferentes variações que ocorrem no interior da seção de testes, originados pela passagem do fluxo de ar, entrando no bocal de contração até a seção do difusor. Algumas variações de velocidade, pressão, ruídos, entre outros, devem ser registrados, assim como o impacto do fluxo de ar em estruturas fixas, em escala reduzida.

2.4.1 Máquina de fumaça

A máquina de fumaça é utilizada para auxílio durante a utilização do túnel de vento. Através do fluxo de fumaça gerado será possível visualizar as linhas de escoamento de ar dentro da seção de testes. Para o projeto foi utilizada uma máquina de fumaça de pequeno porte, geralmente utilizada em eventos comemorativos, como mostrado na Figura 11. O fluxo da fumaça pode ser liberado a partir do bocal de contração, parte inicial do túnel de vento ou, através da utilização de um tubo, direcionada para que seja dispersada dentro da seção de testes, em extremidades ao redor do objeto em estudo ou aonde for mais conveniente, de acordo com o objeto e suas dimensões.

Figura 11 - Máquina de fumaça.



Fonte: Americanas, 2023

2.4.2 Anemômetro

Instrumento para medir a velocidade de fluidos gasosos. Existem diversos modelos e utilizam diferentes tecnologias para a realização das medições. Alguns são próprios para a medição de ventos, como o do tipo hélice, como exemplificado na Figura 12, conchas, copo ou caneca e outros para líquidos. Os mais comuns, utilizam conchas hemisféricas para o acionamento de um mecanismo com um sensor eletrônico, responsável pela leitura da velocidade do vento.

Figura 12 - Anemômetro tipo hélice.



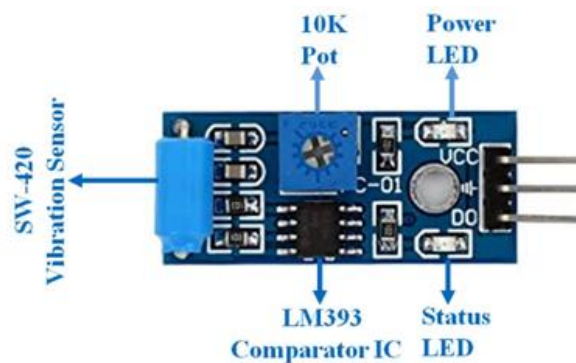
Fonte: Sigasensors, 2023

De acordo com Almeida (2004), o anemômetro que utiliza a tecnologia de ultrassom possui aplicações específicas por interferirem menos no fluxo de ar. A medição ocorre com a emissão de um sinal ultra-sônico, que é gerado pelo próprio fluxo de ar. Conforme Sampaio et al (2005), os anemômetros podem ser calibrados em túnel de vento, onde se pode obter um fluxo uniforme e controlado do ar.

2.4.3 Sensor de vibração

Segundo (RANGEL 2010), o sensor de vibração é um equipamento muito utilizado no âmbito industrial. Máquinas que em funcionamento, apresentam oscilações, sejam em quaisquer níveis, podem ser detectadas de maneira rápida pelo sensor de vibração. Permite o controle dos equipamentos, quando conectados aos mesmos. Isso faz com que seja um item indispensável para o controle e supervisão dos processos produtivos nos mais diversos segmentos. Essencial para a proteção das máquinas, o sensor de vibração funciona da seguinte forma: quando detecta a vibração de algum dispositivo, o mesmo emite um sinal normalizado o qual pode acabar sendo enviado para um indicador digital. Na Figura 13 abaixo é exemplificado um sensor de vibração.

Figura 13 – Sensor de vibração.



Fonte: Eletrogate, 2017

2.4.4 Sensor de ruídos

Segundo Daniel Moraes Santos (2016), para o monitoramento dos ruídos durante os testes, será necessária a utilização de um equipamento decibelímetro ou sensor de ruídos. O objetivo é a verificação do ruído gerado pelo fluxo de ar, quando em contato com os equipamentos.

2.4.5 Balança

A balança aerodinâmica tem a função de medir os esforços aerodinâmicos atuantes no modelo que está sendo testado no túnel de vento, e por isso, está localizada na seção de testes (SOTHE, SOUZA, DEYNA, 2011).

A finalidade da balança é determinar os coeficientes de arrasto e de sustentação, forças que são diretamente ligadas ao perfil da asa que se deseja estudar.

Basicamente, há uma força aplicada sobre o modelo que está na seção de testes, quando o túnel de vento está funcionando. A passagem de ar em uma certa velocidade, faz com que o objeto se desloque. A variação de posição, que será medida pela balança, fará com que seja possível obter os esforços aerodinâmicos.

2.4.6 Asa mecânica

Outro tipo de teste proposto é a simulação de uma asa mecânica, que seja capaz de ser movimentada a partir da utilização de um motor de passo e uma placa de arduino. Trata-se da simulação do movimento de uma aeronave em pleno voo, observando-se o comportamento do fluido ao seu redor e analisando as componentes verticais e horizontais.

3 DESENVOLVIMENTO

A etapa da construção do protótipo do túnel de vento começa com a determinação das medidas de cada uma das seções. O passo inicial é a determinação dos materiais a serem utilizados e a dimensão necessária da seção de testes.

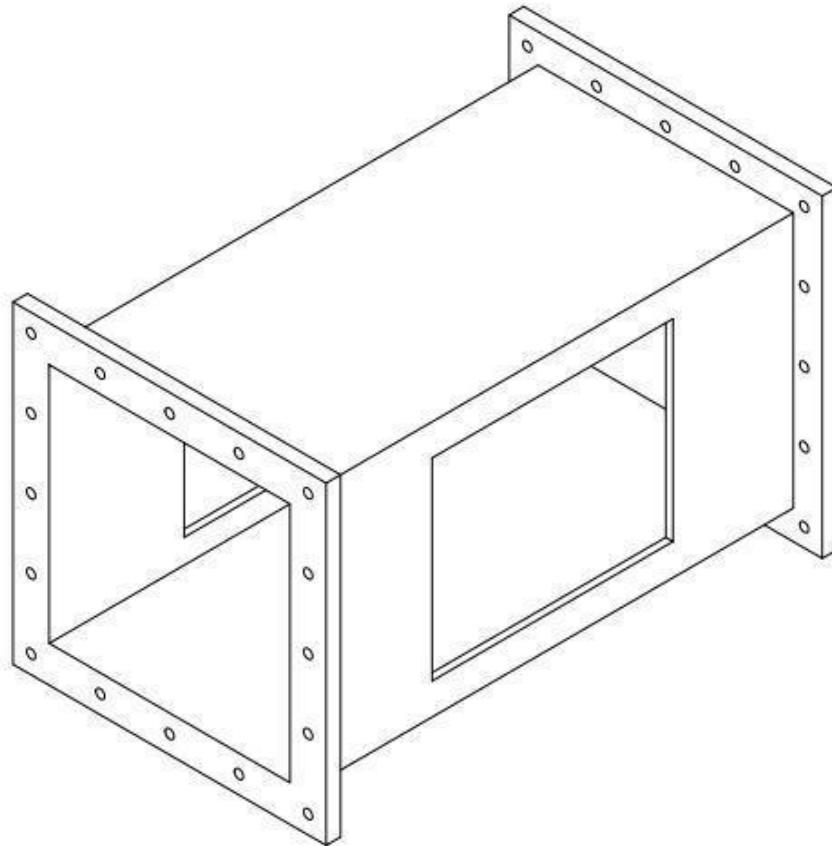
Optou-se pela utilização de chapas de eucatex, a partir da utilização de divisórias de ambiente que foram cedidas pela universidade no Campus de Pituaçu. As divisórias foram desmontadas e cortadas de acordo com as dimensões de cada seção e utilizadas como as paredes das seções. A definição das dimensões da seção de testes foi decorrente da necessidade de um espaço, que fosse suficiente para os testes de pequenos equipamentos, compatíveis com os recursos disponíveis e observando-se o orçamento do projeto. Foi determinado que a seção de testes, assim como as outras seções, devem apresentar as seguintes dimensões:

3.1 SEÇÃO DE TESTES

Conforme Figura 14, a seção de testes foi dimensionada para ter uma área de seção transversal de $0,25 \text{ m}^2$, ou seja $0,5 \text{ m}$ de largura por $0,5 \text{ m}$ de altura. Essa medida foi definida considerando a altura dos objetos a serem colocados para a realização de testes na seção de testes do túnel de vento, assim como foi considerada um espaço entre os objetos e as paredes, garantindo segurança para a realização dos testes. O comprimento total foi definido em 1 m , resultante dos cálculos necessários para que o fluxo de ar desenvolvesse velocidade suficiente ao passar por essa seção.

Para a conexão da seção de testes com as demais seções do túnel de vento, sendo a colmeia em uma das extremidades e na outra o bocal difusor, foram desenvolvidos flanges de madeira fixados na própria seção de testes e fixados às demais seções com parafusos e porcas de aço. Entre os flanges, para garantir a hermeticidade do fluxo de ar durante o funcionamento do túnel, foram utilizadas fitas de borracha, reaproveitadas de material reciclado. A fixação das borrachas aos flanges foi realizada com a utilização de pregos de aço e cola de silicone.

Figura 14 – Seção de testes.



Fonte: Autoria própria, 2024

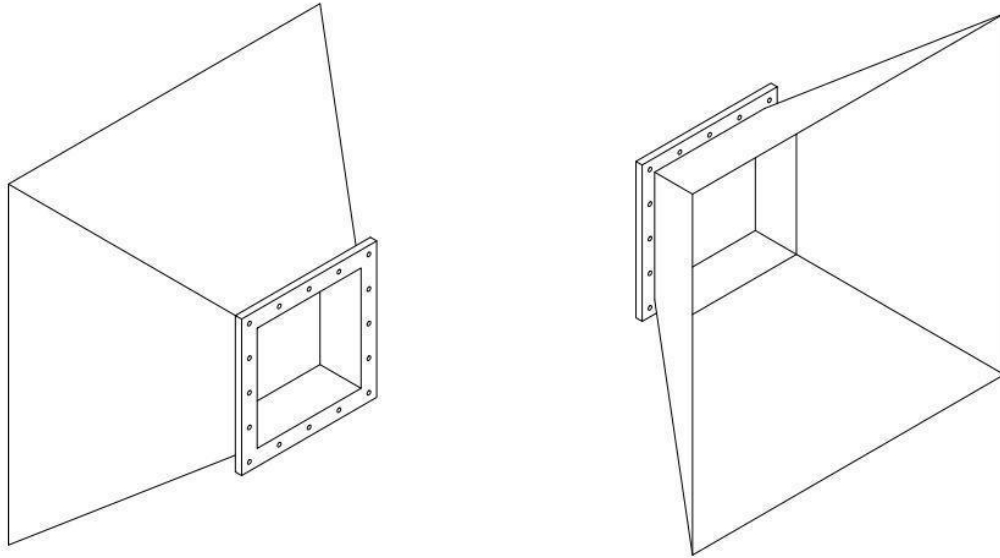
3.2 BOCAL CONVERGENTE

Como visto da Seção 2.1.3, Barlow, Rae e Pope (1999) afirmam que a razão recomendada entre as áreas das seções transversais da seção de teste e do bocal convergente é de 6 a 10 vezes. Conforme Figura 15, definindo a medida do lado maior de uma das faces do bocal em 1,5m de comprimento e resultando em uma área de seção transversal quadrada de 2,25 m². Pelo lado menor, ou seja, o lado no qual é encaixada a seção de testes, a qual a medida do lado foi definida em 0,5 m e área da seção transversal quadrada em 0,25 m², é possível obter a razão entre as áreas de 9 vezes, ficando o resultado dentro do intervalo recomendado.

Outra recomendação descrita na Seção 2.1.3 proposta por Bell e Mehta (1988) é de que o comprimento do bocal convergente seja, aproximadamente, 0,89 vezes o raio hidráulico do mesmo. Para o cálculo do raio hidráulico, que representa a metade

da medida do lado maior, ou seja, 1,5 m e dividido por 2 resulta em 0,75 m, que quando multiplicado pela referência de 0,89 resulta em 0,67 m

Figura 15 – Bocal convergente.



Fonte: Autoria própria, 2024

3.3 BOCAL DIVERGENTE

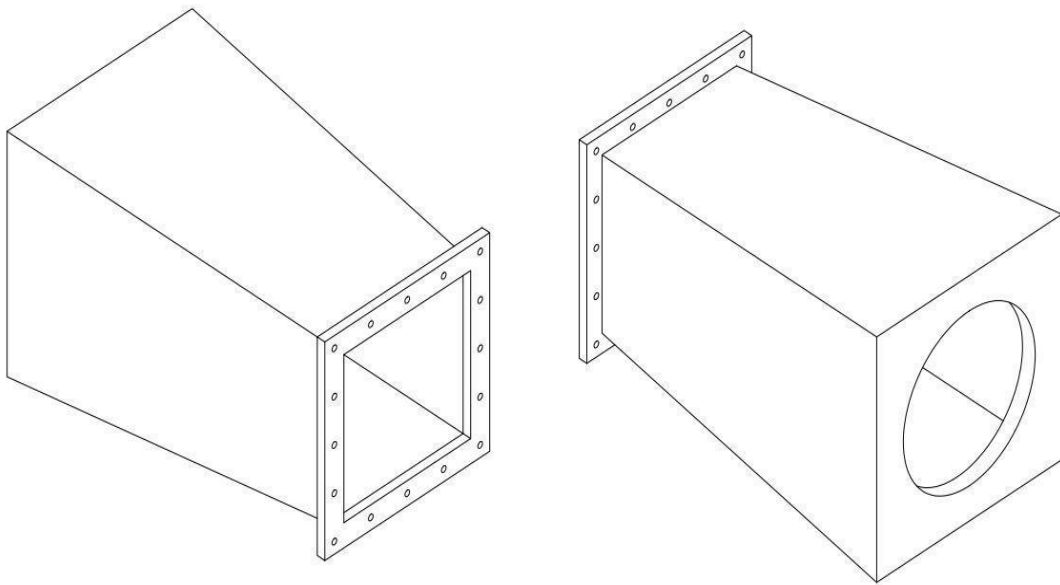
Foi citado que a razão recomendada entre a área da seção transversal da seção de teste e do bocal divergente é entre 2 a 5 vezes, segundo Mehta e Bradshaw (1979).

Conforme Figura 16 a razão entre as áreas para a foi definida em 2 vezes, partindo da área quadrada da seção transversal da seção de testes, já estabelecida em 0,25 m² e resultando na área quadrada da seção transversal do bocal divergente em 0,50 m².

Novamente, citado por Mehta e Bradshaw (1979), o ângulo cônico do bocal divergente não deve passar de 5°. Para o projeto, será utilizado este valor de angulação.

Em seguida, é necessário definir o comprimento do bocal. Como dito anteriormente, o intuito seria de reduzir o máximo, devido a limitação de espaço que o túnel poderá ocupar. A Equação 24 descrita anteriormente já mostra a forma de definir tal comprimento, resultando em 1,18 m de comprimento para as arestas do bocal

Figura 16 – Bocal divergente.



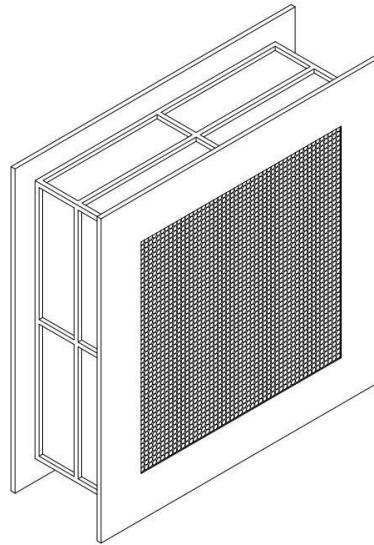
Fonte: Autoria própria, 2024

Com a definição das medidas e os materiais preparados, a próxima etapa é a da montagem de cada seção de modo separado. O local utilizado foi cedido pelo campus da Ucsal em Pituaçu, onde o protótipo será montado e ocorrerá a realização dos testes propostos no projeto.

3.4 COLMÉIA

Como visto na seção 2.3.2 a colmeia tem a função de fazer com que o fluido saia do estado turbulento para o estado laminar de maneira que, ao sair do bocal de contração e chegar na seção testes o fluido esteja uniforme.

Durante a construção do protótipo foi observado pela equipe que a colmeia deveria se tornar um módulo separado do bocal de contração e ser posicionado entre o bocal e a seção de testes. A Figura 17 abaixo mostra o esboço da colmeia. Os aspectos relacionados ao comprimento dos filamentos e a seção transversal obedecem a razão de 7 vezes, conforme Pereira (2011). A seção transversal do filamento utilizado é de 10mm, resultando no comprimento de 70 mm, passando essa a caracterizar a espessura da colmeia do túnel de vento.

Figura 17 – Colmeia.

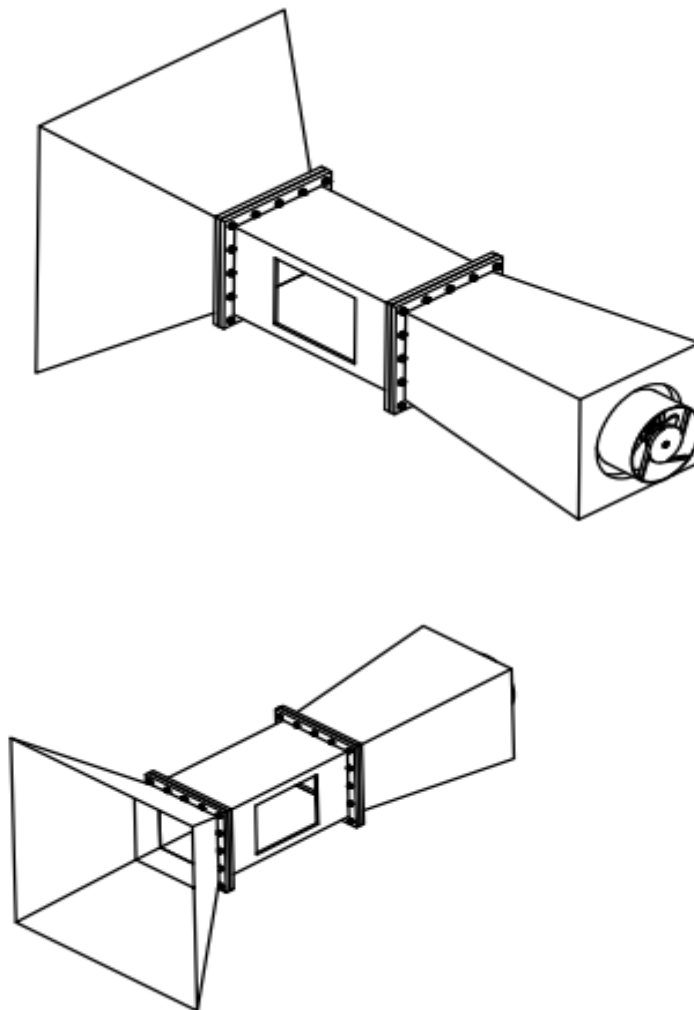
Fonte: Autoria própria, 2024

3.5 PROJETO DO TÚNEL DE VENTO

A modelagem 3D tem como objetivo avaliar o desempenho do equipamento, aplicar melhorias de projeto, seja em suas dimensões, formato geométrico. A simulação após a modelagem serve para avaliar o deslocamento do fluido sobre a região de testes do túnel de vento e assim coletar dados como da resistência do material, perdas de carga, pontos críticos na sua estrutura.

Representações do projeto são importantes para o seu correto dimensionamento. Desde a seção de testes, ao difusor e bocal são necessários serem representados de forma que suas medidas, formatos sejam bem representados. O projeto teve como princípio a criação do esboço do que seria o projeto final de um túnel de vento. Dimensões, respeitando requisitos como unidade de medida, representações em vistas e em perspectiva foram realizadas e representadas em figuras. A Figura 18 apresenta as vistas isométricas do protótipo.

Figura 18 - Vistas isométricas projeto túnel de vento.



Fonte: Autoria própria, 2024

3.6 TESTES DE DESEMPENHO

Com o protótipo finalizado, os testes para a verificação do desempenho são necessários. Na etapa de planejamento foram considerados instrumentos para a análise dos diversos aspectos do seu funcionamento, assim como as interações e análises dos dados fornecidos, tais como velocidade do fluxo de ar, visualização do tipo de escoamento do fluxo de ar, nível de ruído interno e externo durante o funcionamento do protótipo, testes com outros protótipos em dimensões reduzidas, capazes da realização considerando as dimensões máximas de segurança e a

visualização da interação das forças do fluxo de ar com sólidos, colocados no interior da seção de testes.

3.6.1 Teste de velocidade do ar

A medição da velocidade do fluxo interno de ar utilizando um anemômetro digital modelo com hélice remota, ficando o sensor na parte interna e o visor digital fora do túnel de vento. Foram considerados um ponto fixo e um suporte móvel, possibilitando a medição em pontos variados na seção de testes.

3.6.2 Teste da visualização do fluxo de ar

Para a visualização do fluxo de ar foi utilizada uma máquina de fumaça. Foram definidos dois pontos para a realização dos testes, sendo o primeiro ponto externo ao túnel de vento, liberando a fumaça na frente do bocal de contração. Para o segundo ponto, com o auxílio de um cano metálico, similar aos canos de cobre, utilizado em aparelho de ar-condicionado, do tipo Split, foi possível a liberação da fumaça diretamente no interior da seção de testes, logo após a colmeia.

3.6.3 Teste de hermeticidade

Teste que possibilita a verificação da vedação das fazes do protótipo. Para o teste foram utilizadas hastes de arame fino com pedaços de linha de lã, presos nas extremidades. Os pedaços de lã foram colocados em locais próximos às arestas, no interior da seção de testes. Com o túnel de vento em funcionamento observou-se o movimento dos pedaços de lã, não sendo observado nenhum desvio de direção, permanecendo alinhados ao fluxo de ar durante o teste.

3.6.4 Teste do nível de ruído

Em relação ao nível de ruído durante a utilização do túnel de vento e com o auxílio de um aplicativo de detecção de ruídos, instalado em aparelho celular de sistema operacional android, foi gerado um gráfico do ruído com o túnel de vento em

funcionamento. O nível de ruído deve ser mantido dentro dos níveis aceitáveis, conforme norma de segurança, para que não afete a segurança física das pessoas durante a utilização do protótipo.

3.6.5 Teste do deslocamento do fluxo de ar

Para a visualização da interação do fluxo de ar e das forças geradas sobre os sólidos a partir dessa interação, foi adaptada uma asa mecânica, similar a um aerofólio movido com a utilização de uma placa de arduino e conectada a um motor de passo, já previamente programado para simular os movimentos no aerofólio. Com a realização desse teste, auxiliado pela utilização da máquina de fumaça, espera-se a visualização do deslocamento do fluxo de ar, assim como a possibilidade da interação e direcionamento do fluxo, auxiliando o estudo das forças de arrasto e sustentação, que compõem.

Outros testes foram programados para a verificação da capacidade do fluxo de ar gerado pelo protótipo e que precisam ser mais bem elaborados e descritos para a realização e compreensão dos resultados, tais como, teste para aferição da variação da pressão interna, possível a partir da utilização de dinamômetro tubular, células de carga ou detectores de variação de pressão. Assim como, teste de medição de força de deslocamento de massa com a utilização de balanças digitais.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO

A partir dos resultados dos testes realizados, para explorar a capacidade da geração do fluxo de ar interno e ampliar o conhecimento sobre a mecânica dos fluidos, é possível a comparação dos dados obtidos com dados reais, sendo essa a principal função da utilização dos protótipos, como apresentado aqui com o túnel de vento.

4.1 VELOCIDADE DO AR

O valor máximo registrado para a velocidade foi de 4,95 m/s, conforme apresentado na Figura 19, ficando abaixo do valor mínimo esperado de 13 m/s, definido na fase inicial do projeto.

Figura 19 - Registro da velocidade do ar com o anemômetro digital.



Fonte: Autoria própria, 2024

As medições foram realizadas com o sensor do anemômetro fixado ao final da seção de testes, ponto no qual foi obtido o maior resultado da velocidade do ar no interior do túnel. Outras medições foram realizadas com a utilização de um suporte móvel para o anemômetro, mas não obtiveram resultados satisfatórios, registrando valores menores do que aqueles obtidos quando utilizado o ponto fixo.

Analisando as velocidades obtidas, percebe-se que a perda de pressão ou perda de carga ao longo do protótipo ficou acima do que foi calculado, quando consideradas as referências bibliográficas consultadas.

Outro fator que contribuiu para a baixa velocidade obtida com o protótipo foi o da potência do exaustor utilizado. A escolha foi baseada nas especificações técnicas obtidas pelo fornecedor, tidas como apropriadas para uma boa qualidade do fluxo de

ar, principalmente, em relação à velocidade. Porém, quando comparadas com o desempenho a partir da sua utilização para a obtenção do fluxo de ar gerado no interior do túnel de vento, o resultado ficou muito abaixo do esperado.

4.2 ESCOAMENTO

Com o túnel de vento em funcionamento simultâneo com a máquina de fumaça, é possível a visualização das camadas de ar, de maneira uniforme e com o fluxo laminar, conforme Figura 20 a seguir.

Figura 20 - Teste da visualização do fluxo de ar.



Fonte: Autoria própria, 2024

Com o fluxo de ar do tipo laminar, ou seja, o escoamento laminar, fornece melhor condições para a realização de testes e obtenção de dados para análise dos resultados e comparação com dados reais.

4.3 HERMETICIDADE

Foram utilizadas hastes de arame fino com pedaços de linha de lã, presos nas extremidades, conforme apresentado na Figura 21 a seguir. Os pedaços de lã foram colocados em locais próximos às arestas, no interior da seção de testes. Com o túnel de vento em funcionamento observou-se o movimento dos pedaços de lã, não sendo observado nenhum desvio de direção, permanecendo alinhados ao fluxo de ar durante o teste.

Figura 21 - Teste de hermeticidade.



Fonte: Autoria própria, 2024

4.4 NÍVEL DE RUÍDO

Conforme a Figura 22, o nível médio de ruído registrado pelo aplicativo, a partir da geração de um gráfico indicativo, foi de 51 decibéis. As medições foram realizadas tanto na parte interna quanto na parte externa da estrutura do túnel de vento e não apresentaram variação relevante.

Figura 22 - Teste do nível de ruído.



Fonte: Autoria própria, 2024

4.5 INTERAÇÃO DO FLUXO DE AR COM SÓLIDOS

Para o estudo da interação do fluxo de ar com os sólidos, foi desenvolvida uma asa mecânica, similar a um aerofólio, e conectado a uma placa de arduino com um motor de passo, com movimentos previamente programados, evitando-se a necessidade da abertura da seção de testes para a movimentação do objeto. A asa mecânica foi disponibilizada no interior da seção, conforme apresenta a Figura 23, compatível com as dimensões necessárias para a realização dos testes. Durante o teste é possível visualizar a interação do fluxo de ar, quando da aplicação da fumaça, com os sólidos e o deslocamento do escoamento, melhorando o estudo da aerodinâmica dos objetos.

Figura 23 - Teste do deslocamento do fluxo de ar.



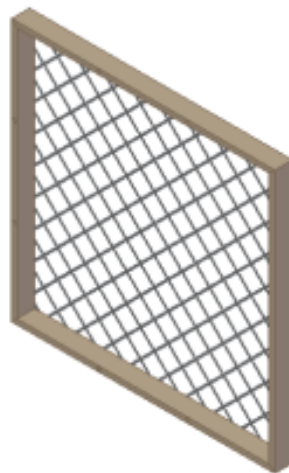
Fonte: Autoria própria, 2024

4.6 SUGESTÃO DE MELHORIA

Com a realização do protótipo e o avanço dos testes propostos, melhorias para a estrutura em suas diferentes partes ou seções foram consideradas. Melhorias na composição, materiais utilizados e o próprio sistema de propulsão, se aprimorado, poderá aumentar a velocidade do fluxo de ar e em consequência, auxiliar na aplicação

e desenvolvimento de novos testes com o protótipo. Algumas das sugestões referem-se à seção de estabilização. Alguns autores consideram a instalação de telas, conforme apresentada na Figura 24, um modelo de tela, o que pode melhorar a performance do fluxo do ar, além de representar menor custo de construção quando comparado com os custos da colmeia, assim como o desempenho e influência na perda de carga.

Figura 24 - Tela de fios de nylon.



Fonte: Tiburcio, 2021

Outra sugestão, agora para a seção de testes, possibilitando melhorar a visualização interna está relacionada a substituição das laterais por chapas de acrílico em seu comprimento total, conforme Figura 25, favorecendo o registro dos dados durante a realização dos testes.

Figura 25 - Seção de testes.



Fonte: Oliveira, 2015

Para o sistema de propulsão, objetivando o aumento na velocidade do fluxo do ar, algumas diferentes opções foram levantadas, com diferentes custos associados.

São opções que consideram a substituição total do equipamento por outro de maior potência, conforme apresentado na Figura 26, um exaustor com potência de 1 Hp.

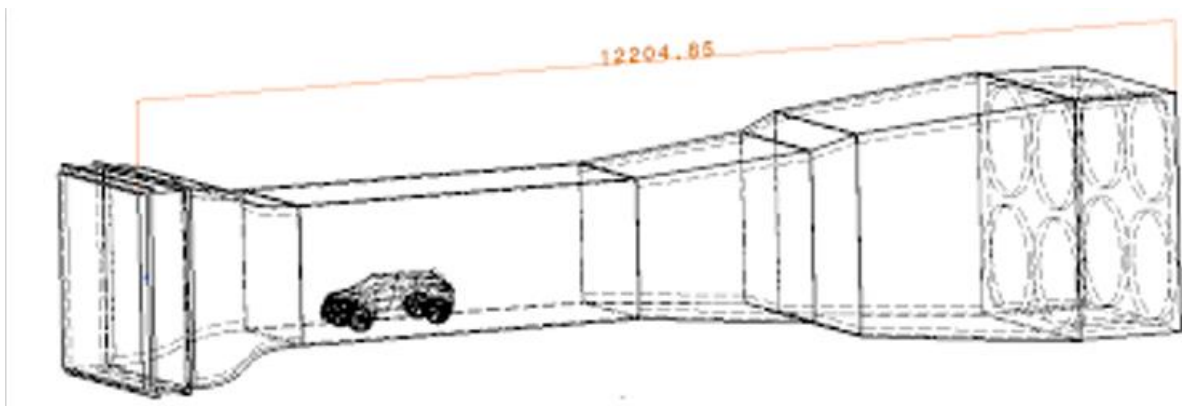
Figura 26 - Exaustor axial industrial 1 Hp de potência.



Fonte: Mercado Livre, 2024

Outra opção é a utilização de mais de um exaustor, conforme Figura 27, que apresenta um esquema do bocal difusor, com a utilização de quatro exaustores para o sistema de propulsão.

Figura 27 - Perspectiva isométrica do túnel.



Fonte: Revista Industria 4.0

Outra sugestão é a decisão da utilização de um motor elétrico de média potência, para o giro de uma hélice de modo direto ou com um sistema de transmissão, utilizando uma polia e correia. Conforme figura 28, apresenta um motor de 3 Hp de potência e com acoplamento do eixo de rotação diretamente na hélice, compondo o sistema de propulsão do túnel de vento.

Figura 28 - Primeiro túnel de vento brasileiro.



Fonte: Jornal Opção, 2018

Por fim, procedimentos e instruções para a utilização geral do protótipo, considerando procedimentos de segurança, baseados em normas conhecidas, assim como procedimentos para a realização dos testes, além da emissão de relatórios que relatem os métodos e as análises dos resultados obtidos através dos testes e que favoreçam a continuidade do processo de aprendizagem.

5 CONCLUSÃO

A construção do protótipo do túnel de vento propiciou o desenvolvimento de conceitos vistos ao longo do curso de engenharia mecânica. A aplicação na prática contribuiu para reafirmar o uso da metodologia utilizada, voltada para a pesquisa e obtenção de soluções e ainda enriqueceu a visão da atuação do profissional de engenharia em diversos setores.

As possibilidades para a exploração do protótipo foram apresentadas a partir dos testes de desempenho, elaborados e realizados, mas percebe-se ainda um potencial elevado de novas alternativas quando agregados os conhecimentos de diversas áreas do conhecimento. Limitações foram encontradas durante a execução do projeto, sendo a disponibilidade de material adequado e de baixo custo o que representou maior impacto, levando o orçamento inicialmente definido a ser frequentemente analisado e forçando os executores na busca por soluções compatíveis para manter a qualidade do objetivo final do projeto.

Quanto aos resultados obtidos com o protótipo, o aspecto da velocidade não ficou conforme definido durante o projeto, que era gerar um fluxo de ar com velocidade superior às médias de vento na região da cidade de Salvador, no estado da Bahia, atualmente de 13m/s. A velocidade máxima do fluido no protótipo foi de 4,95 m/s, o qual afeta diretamente a qualidade dos resultados dos testes. Quando em um nível mais elevado de velocidade, poderia favorecer uma melhor comparação dos resultados da teoria com a prática. Com esse resultado abaixo do esperado, os testes de variação de pressão ou massa tornaram-se inviáveis para execução e análise de resultados.

Ainda assim, o protótipo apresenta um funcionamento satisfatório, conseguindo gerar um fluido uniforme e laminar, capaz de comprovar o conhecimento teórico relacionado aos conceitos da mecânica dos fluidos. Em conclusão, a equipe conseguiu cumprir com os objetivos propostos de projetar e construir um protótipo de túnel de vento, apresentando um produto capaz de ser utilizado e desenvolvido para a aplicação e ampliação dos conhecimentos acadêmicos.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Will Ribamar Mendes. 2004. **Anemômetro Baseado no Método de Tempo de Trânsito: Estudo comparativo de arquiteturas, avaliação de incertezas e implementação.** Dissertação de Mestrado (Mestre em Engenharia Elétrica) Universidade Federal do Maranhão, 2004. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/73090/1/2007_eve_Irrcoutinho.pdf. Acesso em 24 sep. 2023.
- BARLOW, J. B; RAE, W. H; POPE, A. **Low Speed Wind Tunnel Testing.** 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1999.
- BISTAFA, Sylvio Reynaldo. **Mecânica dos fluidos: Noções e aplicações.** 2015. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br/Acervo/Publicacao/158690>. Acesso em: 24 sep. 2023
- BRASILIANO, Gustavo Augusto da Paixão. **Dimensionamento de um túnel de vento.** Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) Universidade Tecnológica do Estado do Paraná, Londrina 2022, Paraná. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/29359>. Acesso em: 24 set. 2023.
- CARMINATTI, Luiz Jyonathan; KONRATH, Rodrigo. 2019. **Desenvolvimento de um túnel de vento subsônico com foco no ensino didático.** Anais - Engenharia Mecânica V.4 N°1 2019.
- ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações.** 1. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012.
- ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Heat And Mass Transfer: Fundamentals & Applications.** Nova York, NY: Mc Graw-Hill, 2015.
- CENGEL, Y. A. ; CIMBALA J. M. **Mecânica dos fluidos.** Disponível em: Minha Biblioteca, (3rd edição). Grupo A, 2015.
- COELHO, João Carlos Martins. **Energia e fluidos: Mecânica dos fluidos.** 2016. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br/Acervo/Publicacao/163659>. Acesso em: 24 sep. 2023.
- CYPRIANO, Marcos Almeida; IMANISHI, Roberto Makio Martins. **Estudo das Forças Geradas por uma Hélice,** 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.
- ECKERT, W. T.;MORT, K. W; POPE, J. **Aerodynamic Design Guidelines and Computer Program for Estimation of Subsonic Wind Tunnel Performance.** Washington, D. C.: Ames Research Center and U.S. Army Air Mobility R& D Laboratory,1976.
- DRESCH, Aline; LACERDA, Daniel Pacheco; ANTUNES JÚNIOR, José Antonio Valle. **Design science research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia.** Porto Alegre: Bookman, 2015.

ELGER, Donald F. **Mecânica dos Fluidos para Engenharia**, 11ª edição. Disponível em: Minha Biblioteca, Grupo GEN, 2019.

IDEL'CHIK, I. E. **Handbook of Hydraulic Resistance**. Jerusalem: The Israel Program for Scientific Translations Ltd., 1966.

FOX, R. W; PRITCHARD, P. J; MCDONALD, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

LINS, Davi Ribeiro. **Dimensionamento de um Túnel de Vento Subsônico**. 2018. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/54854/1/2018_tcc_drlins.pdf. Acesso em 19 set. 2023.

MARTINS, G. B; JABARDO, P. J. S; NADER, G. **Domando o Vento**. Revista Notícias da Construção, p. 40–42, 2015. Disponível em: https://www.ipt.br/download.php?filename=1199-Revista_Noticias_da_Construcao.pdf. Acesso em 23 set. 2023.

MCKINNEY, M. O; SCHEIMAN, J. **Evaluation of Turbulence Reduction Devices for the Langley 8-Foot Transonic Pressure Tunnel**. Hampton, Virginia: Langley Research Center, 1981.

MEHTA, R. D; BRADSHAW, P. **Tecnical Notes: design rules for small low speedwind tunnels**. The Aeronautical Journal of The Royal Aeronautical Society, p. 443–453, 1979.

NUNES, Gustavo J. Z. **Construção e Calibração do Túnel de Vento do Laboratório de Estudos Aerodinâmicos - LÉA**. 2021.

OLIVEIRA, Rogério Pavan; DALMOLIN, Vinicius. HAUS, Tiago Luis. 2014. **Fabricação de um túnel de vento de circuito aberto para testes visuais em modelos geométricos**. Memorial TCC - Caderno de Graduação 2014/2015. Disponível em: <https://memorialtcccadernograduacao.fae.edu/cadernotcc/article/view/28>. Acesso em 17 ago. 2023.

PEREIRA, J. D. **Wind Tunnels: Aerodynamics, Models And Experiments**. New York: Nova Science Publishers, Inc., 2011. Revista Design & Tecnologia.

QUEIROGA, Arthur de Lima; VIANA, Rhander 2021. **Projeto de Túnel de Vento Didático**. ABCM XXVII - Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica, 08 a 12 de fevereiro de 2021, Curitiba, PR, Brasil. Disponível em: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/33510/1/2022_ArthurDeLimaQueiroga_tcc.pdf. Acesso em 12 ago. 2023.

ROCHA, Lucas Machado. 2019. **Estudo e dimensionamento de hélices para propulsão aeronáutica**. Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal

de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, 2019.

SAMPAIO, Carlos Augusto de Paiva; ULLMANN, Mario Nestor; CAMARGO, Mariana. **Desenvolvimento e Avaliação de Anemômetro de Copos de Fácil Construção e Operação**. Revista de ciências agroveterinárias, Lages, v.4, n.1, p.11-16. 2005. Disponível em: <https://revistas.udesc.br/index.php/agroveterinaria/article/view/5400/3602>. Acesso em 24 sep. 2023.

SILVA, Giovanna C. Costa; SOUZA, Silva L. Ellen; GABRIEL, Leandra de Campos; OLIVEIRA, Wesley José. **Estudo do Movimento da pá de um ventilador axial propulsor**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal de Minas Gerais, Arcos, 2017.

TIBURCIO, Josias Paulucio; JÚNIOR, Márcio Alves Rizzo. 2021 **Túnel de vento: Projeto, Construção e Instrumentação**. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) - Instituto Federal do Espírito Santo, Cachoeiro do Itapemirim, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ifes.edu.br/handle/123456789/1489?show=full>. Acesso em: 05 ago. 2023.

TAYLOR, G. I; BATCHELOR, G. K. **The Effect of Wire Gauze on Small Disturbances in a Uniform Stream**. Cambridge: Trinity College, 1947.